

## Die Formänderung der Hystereseschleife von Transformatorenblech beim magnetischen Kriechen.

Von R. FELDTKELLER.

(Mitteilung aus dem Institut für Elektrische Nachrichtentechnik der Technischen Hochschule Stuttgart.)

Mit 10 Textabbildungen.

(Eingegangen am 13. Mai 1952.)

### 1. Das benutzte ferromagnetische Material.

Es gibt Silizium-Eisen-Bleche, deren ferromagnetische Eigenschaften nach Erregung mit einem wachsenden Wechselfeld nicht sofort ihre Endwerte annehmen, sondern stark kriechen. Zur Beobachtung dieser Kriecherscheinungen wird das Material durch ein

Wechselfeld abnehmender Amplitude abmagnetisiert und dann mehrere Stunden ruhen gelassen. Legt man es nun plötzlich mit einem Wechselfeld tiefer Frequenz und kleiner Amplitude, so nehmen die Grundschwungung noch und die Oberschwingungen der Induktion sofort ihre endgültigen Amplituden und Phasen an, sondern erst nach längerer Zeit, bei Zimmertemperatur erst nach Stunden [1]. Besonders deutlich konnten wir dieses Kriechen an einem Blechkern beobachten [3], der aus einer normalen Fabrikation der Firma *Capo u. Klein*, Düsseldorf-Benrath, stammt. Das Blech enthält 4% Si und 96% Fe, wurde nach dem für Transformatorenblech üblichen Verfahren warm gewalzt, anschließend 24 Stunden bei 900° C geglüht und dann im Ofen langsam abgekühlt. Aus dieser Fabrikation wurden Blechtafeln mit besonders kleiner Verlustziffer  $V_{10} = 0,9 \text{ W/kg}$  ausgewählt, aus ihnen wurden Ringe gefertigt.

Abb. 1 zeigt die beiden Komponenten  $\mu_{LR}$  und  $\mu_{RR}$  der komplexen Permeabilität als Funktion der Feldstärke, Abb. 2 die Ortskurve der komplexen Permeabilität selbst.

Die Kurven der Abb. 1 zeigen, daß das Material seine Anfangspermeabilität bis zu einer Feldstärke von 4 mA/cm beibehält und daß erst oberhalb dieser Feldstärke Barkhausensprünge ausgelöst werden, die ein steiles Anwachsen der Permeabilität zur Folge haben. Bereits bei einer Feldstärke von 12 mA/cm ist die Permeabilität auf den doppelten Wert der Anfangspermeabilität angestiegen.

Die Ortskurve der Abb. 2 bildet mit der Ordinatenachse statt des normalen Winkels von 23° nur

einen Winkel von 8°. Die Permeabilität für  $\hat{H} = 10 \text{ mA/cm}$  wird danach aus der Anfangspermeabilität von  $470 \mu_0$  aus einer von den normalen RALEIGH-Hystereseverlusten begleiteten normalen Zunahme

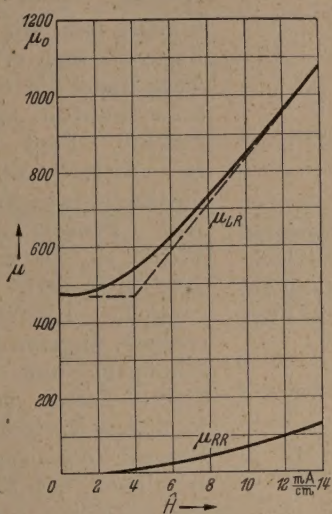


Abb. 1. Komponenten der komplexen Permeabilität mit dem von BARKHAUSEN-Sprüngen freien Anfangsbereich.

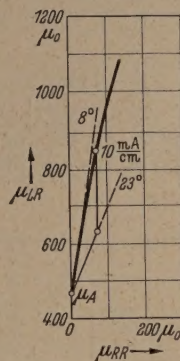


Abb. 2. Ortskurve der komplexen Permeabilität mit der anomalen Hysterese.

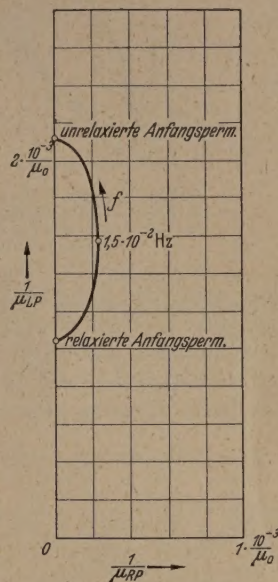


Abb. 3. Kehrwert der komplexen Permeabilität für verschwindende Feldstärke bei Zimmertemperatur. RICHTER-Nachwirkung.

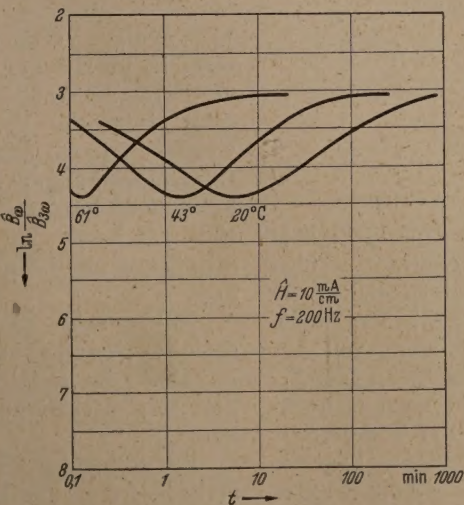


Abb. 4. Pegel der Oberschwingungsinduktion  $\hat{B}_{3\omega}$ .

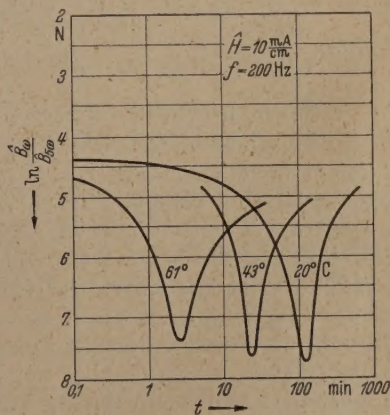


Abb. 5. Pegel der Oberschwingungsinduktion  $\hat{B}_{5\omega}$ .

auf  $620 \mu_0 - j 70 \mu_0$  und aus einer weiteren, hystereseverlustfreien, anomalen Zunahme von  $230 \mu_0$  gebildet.

Der Blechkern zeigt weiter eine RICHTER-Nachwirkung. Abb. 3 zeigt die Ortskurve des Kehrwertes der komplexen Permeabilität bei Zimmertemperatur



für verschwindende Feldstärke. Die unrelaxierte Anfangspermeabilität beträgt  $470 \mu_0$ , die relaxierte Anfangspermeabilität dagegen  $1030 \mu_0$ .

Diese drei Eigenschaften: der von BARKHAUSEN-Sprüngen freie Anfangsbereich, die anomale Hyste-

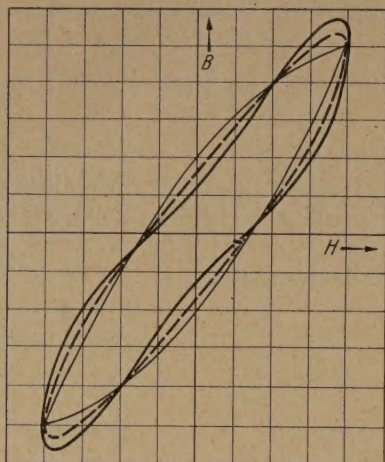


Abb. 6. Normale Hysteresekurve (dünne ausgezogene), Ellipse der Grundschwingung (gestrichelt) und Hystereseschleife mit gegenphasig schwingenden Oberschwingungen (dicke ausgezogene).

rese und die ausgeprägte RICHTER-Nachwirkung sind für das Silizium-Eisen mit starken Kriecherscheinungen charakteristisch. Es ist anzunehmen, daß sie zusammen mit dem Kriechen die gleiche physikalische Ursache haben.

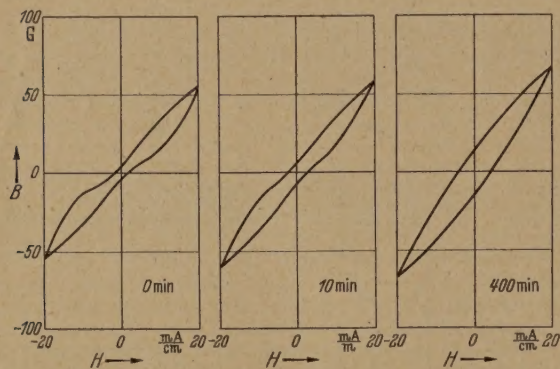


Abb. 7. Die zeitliche Änderung der Form der Hystereseschleife.

## 2. Die wichtigsten Kriecherscheinungen.

Das Kriechen der Grundschwingungspermeabilität ist leicht zu beobachten. Die Permeabilität wächst vom Beginn der Erregung an bis zum Erreichen des stationären Wertes um etwa 20% [4]. Viel deutlicher ist das Kriechen der Oberschwingungen.

Abb. 4 zeigt die Pegel der Oberschwingung  $B_{3\omega}$  mit der Frequenz  $3f$ , bezogen auf die Grundschwingung  $B_\omega$ , als Funktion der Zeit mit der Temperatur als Parameter. Im Augenblick der Erregung liegt die Amplitude der Oberschwingung um etwa 3,3 N unter der Amplitude der Grundschwingung. Mit der Zeit fällt der Pegel der Oberschwingung weiter, nach 7 Minuten durchläuft er auf 4,4 N ein Minimum. Danach steigt er wieder an und erreicht nach 10 Stunden mit 3,1 N seinen Endwert.

Bei höheren Temperaturen beobachten wir prinzipiell denselben Verlauf, nur bei entsprechend kürzeren Zeiten.

Abb. 5 zeigt die Pegel der Oberschwingung mit der Frequenz  $5f$ . Die Minima sind hier viel ausgeprägter, sie werden nach einer etwa 20 mal längeren Zeit vom Beginn der Erregung ab durchlaufen als die Minima der Oberschwingung  $B_{3\omega}$ .

Diesen Verlauf kann man erklären, wenn man annimmt, daß zu Beginn der Erregung eine flüchtige Komponente der Oberschwingung entsteht, die den Betrag nach etwa doppelt so groß ist als die normale Komponente und mit etwa entgegengesetzter Phase schwingt, und daß der Betrag der flüchtigen Komponente bei Zimmertemperatur mit einer Zeitkonstante von etwa 1 h abnimmt. Dann haben die Oberschwingungen zu Beginn etwa dieselbe Größe wie im stationären Zustand, aber die entgegengesetzte Phase.

Es liegt nahe, sich zu fragen, was diese Phasenumkehr für die Form der Hystereseschleife bedeutet. Abb. 6 zeigt eine normale, aus zwei Parabeläste-

stehende Hystereseschleife und die Ellipse, die man erhält, wenn man die Oberschwingungen unterdrückt. Fügt man zu dieser Ellipse die Oberschwingungen mit Phasenumkehr wieder zu, so erhält man die stark ausgezogene Hystereseschleife, die eine Einschnürung und verdickte Enden zeigt. Nach dem Verlauf der Oberschwingungspegel Abb. 4 und 5 sollte man annehmen, daß die Hystereseschleife zu Beginn der Erregung eine solche Form hat und daß sich die normale Form erst im Laufe der Zeit einstellt.

Abb. 8. Die Anfangsform und die Form der Hystereseschleife.

## 3. Die zeitliche Änderung der Form der Hystereseschleife.

Um diese Vermutung zu prüfen, wurde die Hystereseschleife mit der Braunschen Röhre vom Beginn der Erregung an über längere Zeit beobachtet. Abb. 7 zeigt einige der Formen, die dabei photographiert wurden. Die auf Grund der Kriecherscheinungen der Oberschwingungen gewonnene Vermutung, daß die Schleife zu Beginn eine Einschnürung hat, bestätigt sich. Im Laufe der Zeit verringert sich diese Einschnürung und ist nach 7 Stunden völlig verschwunden.

Abb. 8 zeigt die Anfangsschleife und die Schleife übereinandergezeichnet und läßt auch die Zunahme der mittleren Steilheit, d. h. das Kriechen der Grundschwingungs-Permeabilität deutlich erkennen.

Bei Erregung mit sinusförmiger Feldstärke treten also in der Induktion zwei Arten von Hystereseschwingungen: eine stabile Art, die, kurz genannt, durch die Spitzen der Hystereseschleife entsteht, und eine flüchtige Art, die durch die Einschnürung zu Beginn der Erregung vorhandene Einschnürung entsteht. Die beiden Arten schwingen etwa in Gegenphase. Ist die Einschnürung wie bei dem untersuchten Blech stark ausgeprägt, so überwiegt die flüchtige Art, und die Hystereseschwingungen schwingen zu Beginn der Erregung



lscher“ Phase. Geht im Laufe der Erregung die Einschnürung zurück, dann sinkt die Größe der ständigen Oberschwingungen auf die Größe der stabilen Oberschwingungen zurück, sie heben sich in ihrer Wirkung nahezu auf und erzeugen die in Abb. 4 und 5 dargestellten Minima.

Wenn die Einschnürung, wie das der Regel der Fall sein dürfte, nicht so stark ausgeprägt ist, überwiegen von Anfang an die stabilen Oberschwingungen und man beobachtet keine Minima, sondern nur ein monotones Ansteigen mit der Feldstärke [2].

### Die Statistik der BARKHAUSEN-Sprünge.

Abb. 9 zeigt die Formen der Anfangsschleifen bei verschiedenen Amplituden der erregenden Feldstärke.

PREISACH [5] hat die Annahme gemacht, daß sich die Hystereseschleife aus einer sehr großen Zahl elementarer Rechteckschleifen zusammensetzt, die durch ihre mittlere Feldstärke  $H_m$  und durch ihre Breite  $2H_c$  kennzeichnete. Er konnte zeigen, daß eine normale Hystereseschleife mit Parabelbögen entsteht, wenn man annimmt, daß die Werte  $H_m$  und  $H_c$  gleich oft vorkommen.

Wie muß man diese Statistik der BARKHAUSEN-Sprünge abändern, damit Hystereseschleifen von der Form der Abb. 9 entstehen? Abb. 10 zeigt, daß es ausreicht, wenn man die Annahme macht, daß elementare Rechteckschleifen mit mittleren Feldstärken  $H_m$  zwischen den Werten  $+H_g$  und  $-H_g$  vorkommen, daß aber, wie bei PREISACH, alle Werte  $|H_m| > H_g$  und alle Werte  $H_c > 0$  gleich häufig vorkommen. Es sind 5 Lagen der Fronten der Hystereseschleife gezeichnet, die zum aufsteigenden Teil der Hystereseschleife gehören. Die untere Spitze bedeutet die untere Spitze. Bis zur Lage  $b$  wächst die Induktion quadratisch an. Zwischen  $b$  und  $c$  wächst sie weiter, aber längs eines nach unten offenen Parabelbogens, und erreicht bei  $c$  die Abszissenachse. Zwischen  $c$  und  $d$  behält die Induktion den Wert  $B = 0$ . Zwischen  $d$  und  $e$  wächst sie längs einer steil ansteigenden Parabel bis zur oberen Spitze der Hysteresekurve. Die Hystereseschleife, die man auf diese Weise erhält, hat genau die Form der beobachteten Anfangsschleifen, auch für kleinere und größere Amplituden. Für den kleinsten Wert  $H_g$  der mittleren Feldstärke  $H_m$  wird man dabei auf den Wert  $10 \text{ mA/cm}$  geführt, der auch aus Abb. 1 als untere Grenze für die Auslösung von BARKHAUSEN-Sprüngen gilt.

Wenn dieses Modell stimmt, dann könnten wir die beim Kriechen beobachteten Vorgänge folgendermaßen beschreiben: Wenn die Amplitude der Wechsel-

feldstärke kleiner als  $H_g$  bleibt, werden keine BARKHAUSEN-Sprünge ausgelöst.

Wenn die Amplitude der Wechselfeldstärke größer als  $H_g$  ist, entspricht die Statistik der BARKHAUSEN-

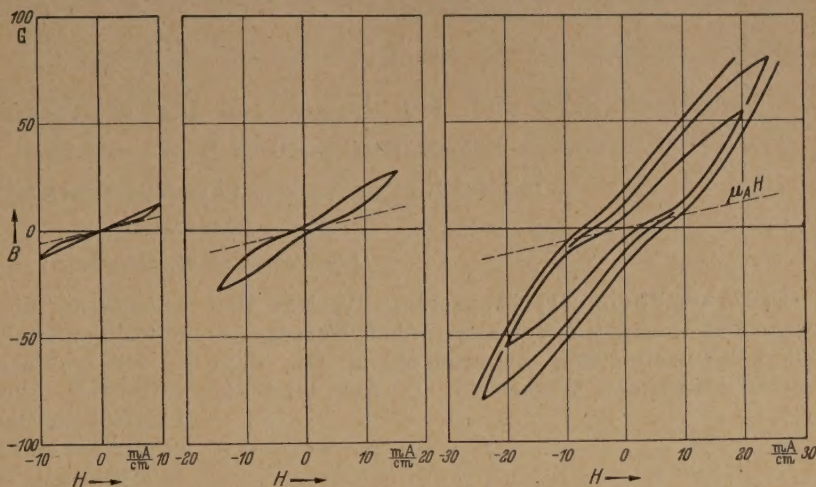


Abb. 9. Die Form der Anfangsschleifen bei verschiedenen Amplituden der erregenden Feldstärke.

Sprünge zu Beginn der Erregung und die Form der Hystereseschleife der Abb. 10. Es beginnt sich aber sofort das ganze, an der Ummagnetisierung beteiligte Dreieck mit den Eckpunkten  $H_m = +\hat{H}$ ,  $H_m = -\hat{H}$ ,

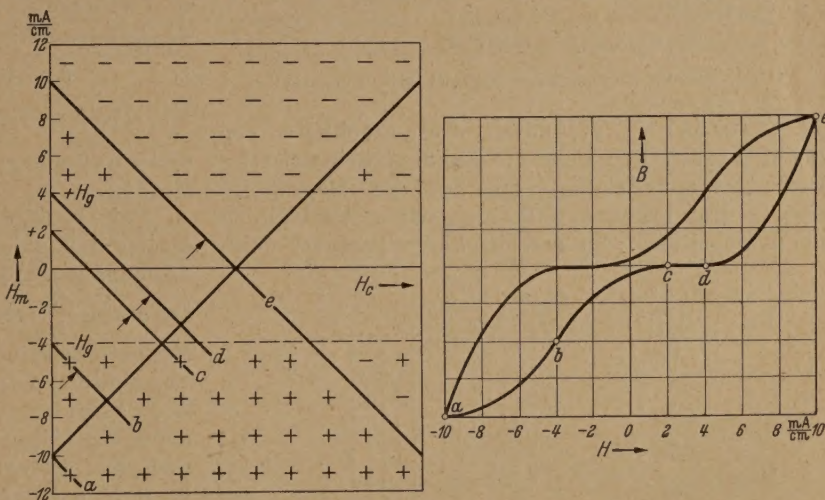


Abb. 10. Statistische Verteilung der BARKHAUSEN-Sprünge.

$H_c = \hat{H}$  gleichmäßig mit Wertepaaren  $(H_m, H_c)$  zu füllen, der leere Horizontalstreifen verschwindet und am Ende des Kriechens herrscht in diesem Dreieck dieselbe gleichmäßige Verteilung wie im PREISACH-Modell.

### Zusammenfassung.

Unmittelbar nach dem Einschalten eines schwachen Wechselfeldes zeigt die Hystereseschleife kohlenstoffhaltiger Silizium-Eisen-Bleche in der Mitte eine starke Einschnürung, die bei Zimmertemperatur im Laufe einiger Stunden verschwindet. Diese Einschnürung ist die Ursache flüchtiger Oberschwingungen. Sie schwingen in Gegenphase zu den stabilen Oberschwingungen, deren Ursache die Spitzen der Hystereseschleife sind. Die Einschnürung ist die Folge einer besonderen, im ent-



magnetisierten Material vorhandenen Statistik der BARKHAUSEN-Sprünge.

**Literatur.** [1] FELDTKELLER, R.: VDE-Fachberichte 13, 302 (1949). — [2] KÄMMERER, H.: Fernmeldetechn. Zeitschr. 2, 201, (1949), Abb. 4. — [3] FELDTKELLER, R., H. WILDE

u. G. HOFFMANN: Angew. Physik 3, 401, (1951). — [4] H. MANN, G.: Arch. d. Elektr. Übertragung 6, 99 (1952) [5] PREISACH, F.: Z. f. Physik 94, 277 (1935.).

Prof. Dr. R. FELDTKELLER,  
Institut für Elektrische Nachrichtentechnik  
der T. H. Stuttgart.

## Untersuchungen über den Ablauf von Teilvorgängen bei der Magnetostraktion.

VON EDUARD BAILITIS, CURT HAGEN UND HANS HEINRICH RUST.

Institut für Angewandte Physik der Universität Hamburg.

Mit 10 Textabbildungen.

(Eingegangen am 25. März 1952.)

Der von JOULE [1] beobachtete Verlauf der Längenänderung des ferromagnetischen Körpers ergibt keinen einfachen Zusammenhang mit dem äußeren erregenden Magnetfeld. In Abb. 1 ist die

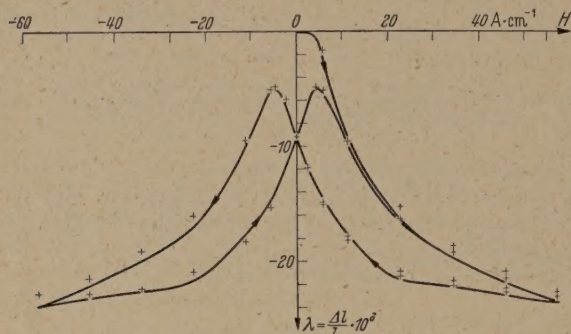


Abb. 1. Gesamtverlauf der Längsmagnetostraktion von Nickel.

von NAGAOKA [2] gefundene Gesamtschleife von Nickel dargestellt, welche die Abhängigkeit der relativen Längenänderung vom äußeren Magnetfeld zeigt. — Man erkennt, daß eine gewisse Analogie zu der magnetischen Hysteresisschleife besteht, denn

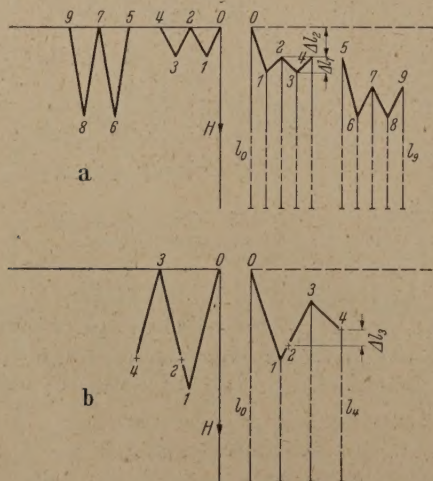


Abb. 2. Prinzip der Messung der Einzelvorgänge bei der Längsmagnetostraktion (schematische Darstellung).

es ergibt sich eine Neu-Kurve, Remanenz in Form einer bleibenden Längenänderung und eine Koerzitivkraft. Da bei der Magnetisierung reversible und irreversible Vorgänge nebeneinander ablaufen, ist es naheliegend anzunehmen, daß die Gesamtschleife eine Synthese aus Einzelercheinungen ist. Zur Deutung der Magnetostraktion erscheint es wün-

schenswert, diese Einzelvorgänge experimentell mitteln zu können.

Die meßtechnische Erfassung der Komponenten vermittelt Abb. 2. Hierin sind die beobachteten Längenänderungen eines Nickelstabes in stark größtem Maßstabe als Funktion der magnetischen Durchflutung aufgetragen. Im entmagnetisierten Zustand besitzt der Nickelstab die Länge  $l_0$  (Abb. 1). Bei der Erregung  $H_1$  nimmt der Stab die Länge  $l_1$  an. Läßt man die Erregung auf  $H_2 = 0$  abnehmen, verschwinden, dann geht der Stab nicht auf die Ausgangslänge  $l_0$  zurück, sondern es bleibt eine Remanenz, so daß sich nun die Länge  $l_2 < l_0$  ergibt. Schaltet man weiter das Erregungsfeld auf  $H_3$  an und wiederum auf  $H_4 = 0$  zurück, so beobachtet man die Längenänderung des Stabes

$$l_1 - l_2 = l_3 - l_4 = \Delta l_1 = \text{konst.}$$

Die relativen Längenänderungen  $\frac{\Delta l_1}{l_0} = \lambda_1$  stellen die erste Komponente der Magnetostraktion dar und werden.

Bei Durchführung des beschriebenen Versuches ergibt sich gleichzeitig eine weitere Meßgröße, die Längenänderung  $l_2 - l_0 = \Delta l_2$ . Die relative Längenänderung  $\frac{\Delta l_2}{l_0}$  stellt eine weitere Komponente der Magnetostraktion dar und wird mit  $\lambda_2$  bezeichnet. Vermindert man die Durchflutung, vom Maximum ausgehend, so ergibt sich eine dritte Komponente der Magnetostraktion in folgender Weise: Läßt man das Erregungsfeld bis zu einem bestimmten Wert  $H_1$  (Abb. 2b) wachsen, dann weist der Stab die Länge  $l_1$  auf. Nimmt nun das Erregungsfeld auf den Wert  $H_2 < H_1$  an, so kommt die Stablänge  $l_2$  zustande. Steigert man anschließend das Erregungsfeld über  $H_3 = 0$  auf den Wert  $H_4 = H_2$ , so geht die Länge des Stabes durch den Wert  $l_3$  auf  $l_4$  über. Die relative Längenänderung  $\frac{l_2 - l_4}{l_0} = \frac{\Delta l_3}{l_0} = \lambda_3$  stellt die dritte Komponente der Magnetostraktion dar. Abb. 2 zeigt den Verlauf der drei Komponenten bei Nickel als Versuchsmaterial.

Der Kurvenzug der ersten Komponenten stellt die Längenänderungen dar, die sich bei Änderung des Erregungsfeldes von einem bestimmten Wert auf Null ergeben. Er bildet den Hauptwert der Magnetostraktion und kann deshalb als Hauptkomponente bezeichnet werden. Der Verlauf dieser Komponente ist fast hysteresefrei. Nur im Gebiet der Koerzitivkraft ist eine kleine Hysterese vorhanden (Abb. 1). Bei genügend hoher magnetischer Erregung st



erste Komponente einem Sättigungswert zu, der in dem untersuchten Nickel  $\lambda_1 = -24 \cdot 10^{-6}$  beträgt (Abb. 4).

Die zweite Komponente der Magnetostraktion bezeichnet die verbleibende Deformation des Stabes in Abhängigkeit vom jeweiligen Betrag des Erregungsfeldes. Sie charakterisiert die magnetostriktive Remanenz des Materials und könnte somit auch Remanenzkomponente der Magnetostraktion genannt werden. Die ihr eigene große Abhängigkeit von der magnetischen Vorgeschichte steht in engem Zusammenhang mit der Remanenz der Magnetisierung.

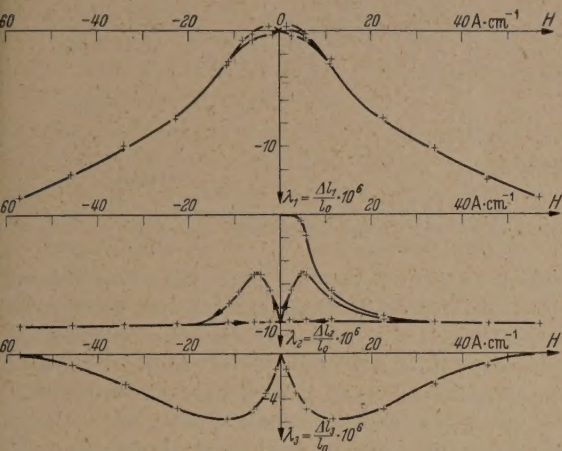


Abb. 3. Die drei Komponenten der Längsmagnetostraktion von Nickel.

Der Versuch zeigt, daß die verbleibende Magnetisierung gleichzeitig eine verbleibende mechanische Deformation des Stabes verursacht. Die Remanenz der Magnetisierung strebt mit ständig zunehmender Erregung einem bestimmten Endwert zu. Auch bei der zweiten Komponente beobachtet man analoges Verhalten. Bei abnehmender Erregung ändert sich der Sättigungswert der zweiten Komponente nicht. Nur bei antiparalleler Lage des Durchflutungsfeldes.

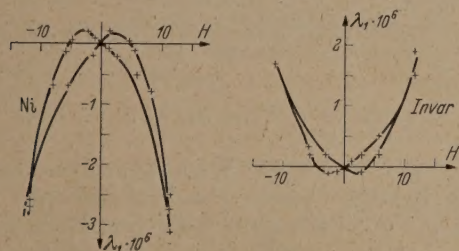


Abb. 3a. Die erste Komponente der Längsmagnetostraktion von Nickel und Invar im Gebiet der Koerzitivkraft.

Die dritte Komponente charakterisiert die Trägheit der Magnetostraktion und könnte infolgedessen Inertienkomponente bezeichnet werden. Nachstehend soll erörtert werden, welche Folgen sich aus dem Verlauf der Komponenten der Magnetostraktion für die Vorgänge in der Magnetisierung ergeben.

Der graphischen Darstellung in Abb. 2 ist zu entnehmen, daß für die Neukurve und den aufsteigenden Ast der Magnetostraktionskurve die Beziehung

$$\lambda = \lambda_1 + \lambda_2 \quad \text{gilt.} \quad (1)$$

Für den absteigenden Ast findet man die Relation

$$\lambda = \lambda_1 + \lambda_2 + \lambda_3; \quad (2)$$

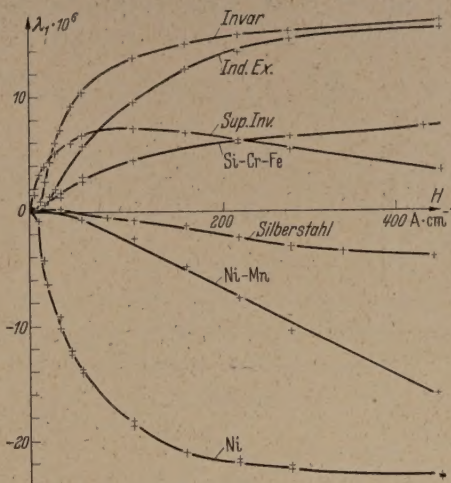


Abb. 4. Die erste Komponente der Längsmagnetostraktion von verschiedenen untersuchten Ferromagnetika.

Werden nun die einzeln gemessenen Komponenten gemäß Relation (1) und (2) superponiert, so erhält man die Gesamtschleife der Magnetostraktion, wie sie

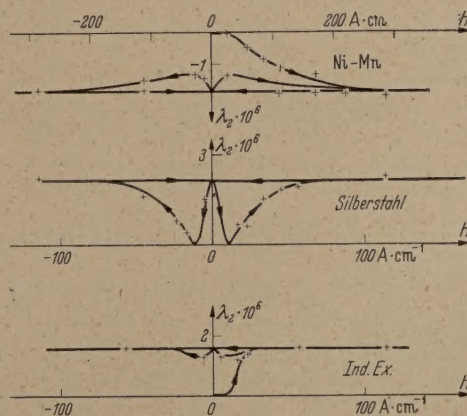


Abb. 5. Zweite Komponente der Längsmagnetostraktion von verschiedenen untersuchten Ferromagnetika.

NAGAOKA gemessen hat. In Abb. 1 ist die Summe der drei Komponenten als ausgezogene Kurve aufgeführt. Die Meßwerte, die sich bei der experimentellen Aufnahme der Magnetostraktion gemäß NAGAOKA ergaben, sind als Meßpunkte (+) nachträglich eingezeichnet; man erkennt ohne weiteres die gute Übereinstimmung zwischen der nach dem hergebrachten Verfahren ermittelten Kurve und der aus den gemessenen Einzelkomponenten zusammengesetzten.

Nach der Methode der Komponentenbestimmung wurden mehrere Materialien, dabei solche, deren magnetostriktives Verhalten noch nicht bekannt war, untersucht. In Abb. 4 ist der Verlauf der ersten Komponenten der untersuchten Materialien dargestellt. Bei Invar, Indilatans Extra, Superinvar und



Si-Cr-Fe weist die erste Komponente positive, bei Nickel, Nickel-Manganlegierung und Silberstahl negative Werte auf.

In Abb. 5 sind die zweiten Komponenten der untersuchten Ferromagnetika dargestellt. Eine besondere Stellung nimmt Silberstahl ein; man erkennt ohne weiteres, daß die zweite Komponente allein für den positiven Anteil der Gesamtschleife verantwortlich ist.

Abb. 6 gibt die dritte Komponente der Magnetostriktion wieder. Sie ist durch eine Kurvenschar

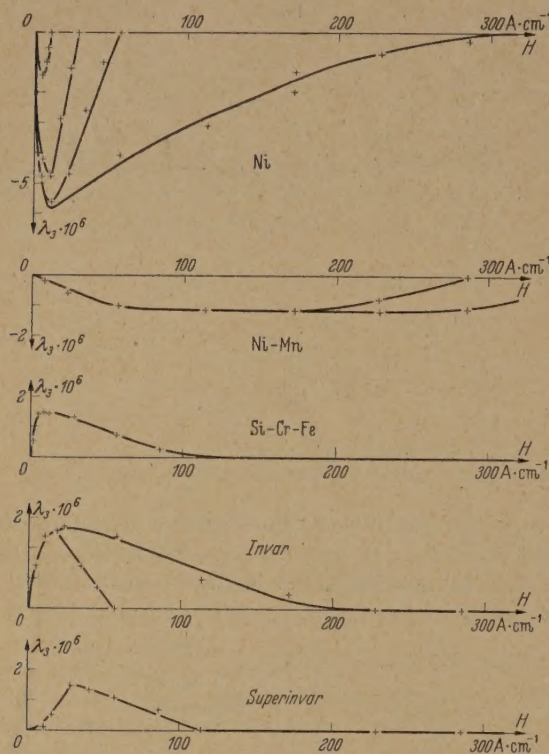


Abb. 6. Dritte Komponente der Längsmagnetostriktion von verschiedenen untersuchten Ferromagnetika.

charakterisiert, wie dies besonders deutlich bei Nickel zu beobachten ist.

Sind die drei Komponenten des in Frage kommenden Materials experimentell ermittelt, so ist in einfacher Weise der Gesamtkurvenzug der Magnetostriktion, auch bei veränderlichen Erregungsfeldern, wie sie beispielsweise bei der magnetostriktiven Ultraschallerzeugung auftreten können, zu konstruieren. Ein Beispiel soll diese Möglichkeit erläutern:

Es soll ermittelt werden, welcher Kurvenzug der Magnetostriktion sich bei Nickel ergibt, wenn das Erregungsfeld zwischen den Werten  $H = 0$  und  $H = H_1$  pendelt. Im Ausgangszustand soll das Material entmagnetisiert sein.

Versucht man diese Frage mit Hilfe der Gesamtschleife zu klären, so erkennt man, daß dies ohne zusätzliche Messungen nicht möglich ist. Sind aber die Komponenten der Magnetostriktion bekannt, so ist nur erforderlich, sie nach den Relationen (1) und (2) zu superponieren. In Abb. 7 ist die graphische Lösung der Aufgabe für Nickel dargestellt.

#### Meßanordnung.

Für die vorliegenden Untersuchungen wurde die von DÖRING [3] angegebene Kapillarmikrometer-

methode in veränderter Form angewendet. Da Probestäbe eine Länge von ca. 1 m besaßen, konnten wegen der verhältnismäßig großen Längenänderungen auf optische Vergrößerungsmethoden zur Ablese des Meniskus verzichtet werden. Die Kapil-

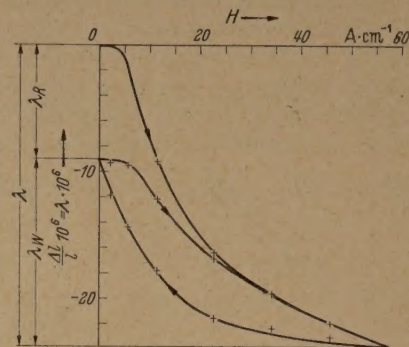


Abb. 7. Magnetostriktionskurve von isotropem, technisch reinem Nickel bei pendelndem magnetischen Erregungsfeld (zwischen 0 und 57 A · cm⁻¹).

methode hat den Vorteil, daß sich ohne Schwierigkeiten der Verlauf der Magnetostriktion kontinuierlich verfolgen läßt. Außerdem ist es möglich, die Versuchsanordnung auf kleinem Raum aufzubauen, bei den meisten anderen Verfahren nicht der Fall.

Abb. 8 gibt einen Überblick über die Gesamtanordnung. Die Erregungsfeldspule hatte eine Länge von etwa 1,80 m, so daß die Proben von ca. 1 m Länge sich im homogenen Teil des Spulenfeldes befanden. Um die Spulenzwärme von der Meßprobe fernzuhalten, war im Innern ein doppelwandiges Rohr unterbracht, durch das Kühlwasser hindurchfloß.

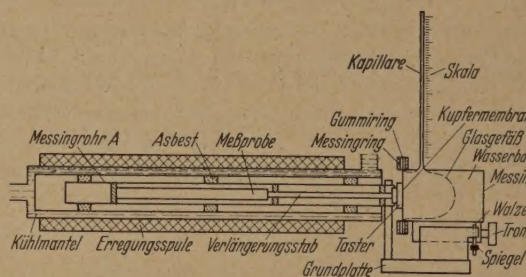


Abb. 8. Schematische Darstellung der Meßanordnung.

6-lagige Spule wies 57 Windungen pro cm auf. Die zur Messung bestimmte Probe wurde in Messingrohr geschoben und an einem Ende fest gelötet. Am anderen Ende war ein Verlängerungsstab aus Messing angelötet, der auf der anderen Seite einen Taster trug. Das ganze wurde so in die Spule eingelegt, daß die Meßprobe die Spulenachse bildete und der Taster und das Messingrohr A etwas heraustraten. Zwischen dem Kühlmantel und dem Messingrohr war ein Zwischenraum von 0,5 mm, der zur Abstützung der Probe und zur Verhinderung des thermischen Ausgleichs teilweise mit Asbest gefüllt war.

Die durch das Erregungsfeld verursachten Längenänderungen des Probestabes wurden mit dem nachfolgend beschriebenen Kapillarmikrometer gemessen. Das Glasgefäß, an das eine Kapillare angeschlossen ist, besitzt eine ringförmige Öffnung mit Flanschen. Über diese Öffnung wird eine Kupfermembran gespannt. Hilfe von zwei Gummi- und zwei Messingringen spannt. Ein Messingring ist mit dem Messingrohr verbunden.



verlötet, so daß gleichzeitig mit dem Aufspannen Membran das Glasgefäß mit diesem Messingrohr verbunden wird. Es ist auf einem waagrecht beweglichen Schlitten befestigt und kann mittels einer Schraube hin- und hergeschoben werden. Die Grundplatte des Kapillarmikrometers ist fest mit dem Messingrohr so verbunden, daß der Taster auf die Membran der Kupfermembran drückt. Das Glasgefäß ist mit Wasser gefüllt, daß der Flüssigkeitsspiegel an der Verbindung zwischen Gefäß und Kapillare stand. Als Kapillarenflüssigkeit wurde Äther wegen der geringeren Viskosität und mit geringerer Einstellträgheit. Mit Hilfe der Schraube war es möglich, den Flüssigkeitsspiegel nach Wunsch bequem einzustellen.

Um die thermische Trägheit zu vergrößern und um die Temperatur der Flüssigkeit weitgehend konstant zu halten, wurde das Glasgefäß mit einem Wasserbad umgeben. Der Verlängerungsstab und der Übertragungsarm, die durch das Erregungsfeld verdrängten Längenänderungen des Probestabes auf die Membran und diese können so stark vergrößert durch die Bewegung des Meniskus ermittelt werden. Die Einstellung dieses Mikrometers erfolgte mittels eines an einer Walze befestigten Spiegels und langem Lichtweg. Die Walze wurde zwischen der Grundplatte und dem Schlitten eingelegt, so daß sie nur Drehbewegungen ausführen konnte. Die Eichung erfolgt durch Einlegen des Meniskus mit der Trommel in zwei verschiedene Lagen und Bestimmung der Drehung des Spiegels. Mit dieser Einrichtung war es stets möglich, die Werte schnell und bequem zu überprüfen.

#### Betrachtungen über den experimentellen Befund.

Zur Deutung des experimentellen Befundes ist es erforderlich, kurz das Wesentliche der heutigen Erkenntnisse aus dem Gebiet der Längsmagnetostraktion zu skizzieren.

Im allgemeinen bewirkt die spontane Magnetisierung in den verschiedenen kristallographischen Richtungen unterschiedliche Deformationen. Bei Eisenkristallen z. B. bedingt die spontane Magnetisierung in der [100]-Richtung eine Verlängerung, in der [111]-Richtung eine Verkürzung. Nur bei isotroper Magnetostraktion ist die Deformation von der Lage des Vektors der spontanen Magnetisierung zur kristallographischen Richtung unabhängig. In erster Linie trifft dies bei Nickel zu. Die hier angestellten Betrachtungen erstrecken sich in erster Linie auf isotrope Magnetostraktion.

Die relative Längenänderung ist in Richtung des äußeren magnetischen Vektors bei beliebiger Lage des magnetischen Vektors der WEISSschen Bezirke isotroper Magnetostraktion

$$\lambda = \lambda_k \left( \overline{\cos^2 \vartheta} - \frac{1}{3} \right) \quad (4)$$

$$\lambda = \frac{3}{2} \lambda_s \left( \overline{\cos^2 \vartheta} - \frac{1}{3} \right),$$

in  $\lambda_k = \lambda_{\text{längs}} - \lambda_{\text{quer}}$ ,  $\lambda_s$  = Sättigungsmagnetostraktion bedeuten. Der zweite Ausdruck ist nur dann gültig, wenn die Volumenmagnetostraktion vernachlässigt ist, was unterhalb der technischen Sättigung der Fall ist.

Die Magnetisierung ist

$$I = I_s \overline{\cos \vartheta},$$

worin  $I_s$  die Sättigungsmagnetostraktion bedeutet.

Zur Berechnung von  $\overline{\cos \vartheta}$  und  $\overline{\cos^2 \vartheta}$  betrachtet man zweckmäßig sämtliche WEISSschen Vektoren als Radiusvektoren mit gemeinsamem Ausgangspunkt. Im idealen Entmagnetisierungszustand bilden die Spitzen der Vektoren eine gleichmäßig belegte Kugeloberfläche. Wenn  $n$  die Belegungsichte bedeutet, dann ist die Gesamtzahl  $N$  der Vektoren

$$N = \int_0^{2\pi} \int_0^\pi n \sin \vartheta d\vartheta \cdot d\varphi.$$

Bei inhomogener Verteilung ist die Belegungsichte eine Funktion von  $\vartheta$  und  $\varphi$ . Die Mittelwerte von  $\overline{\cos \vartheta}$  und  $\overline{\cos^2 \vartheta}$  werden durch

$$\overline{\cos \vartheta} = \frac{\int_0^{2\pi} \int_0^\pi n(\vartheta, \varphi) \cos \vartheta \sin \vartheta d\vartheta d\varphi}{\int_0^{2\pi} \int_0^\pi n(\vartheta, \varphi) \sin \vartheta d\vartheta d\varphi}$$

$$\overline{\cos^2 \vartheta} = \frac{\int_0^{2\pi} \int_0^\pi n(\vartheta, \varphi) \cos^2 \vartheta \sin \vartheta d\vartheta d\varphi}{\int_0^{2\pi} \int_0^\pi n(\vartheta, \varphi) \sin \vartheta d\vartheta d\varphi}$$

gekennzeichnet.

Damit besteht die Berechnung der Magnetisierung und der isotropen Magnetostraktion in der Bestimmung der Verteilungsfunktion  $n(\vartheta, \varphi)$ . Im entmagnetisierten Zustand ist  $n(\vartheta, \varphi)$  eine Funktion der Kristallenergie  $F_k$  und Spannungsenergie  $F_\sigma$ . Bei Gegenwart eines äußeren Feldes hängt die Verteilung noch von dessen Stärke ab, also  $n(\vartheta, \varphi) = F(H, F_k, F_\sigma)$ . Bei der weiteren Betrachtung über den Verlauf der Verteilungsfunktion während der Magnetisierung werden folgende Vereinfachungen gemacht. Zunächst wird angenommen, daß bei der Magnetisierung  $I = 0$  die Belegungsichte auf der Verteilungskugel konstant ist. Weiter wird vorausgesetzt, daß die Verteilung bis zur Achse des Erregungsfeldes rotationssymmetrisch, also eine Funktion des Winkels  $\vartheta$  allein ist. Hinsichtlich des Verlaufes der Funktion  $n(\vartheta)$  während der Magnetisierung wird angenommen, daß sie innerhalb eines bestimmten Winkelbereiches konstant bleibt und außerhalb dieses Bereiches Null wird, wie dies schematisch in Abb. 9d dargestellt ist. Die schraffierte Fläche eines Schnittes durch einen Großkreis der Verteilungskugel in Richtung des Erregungsfeldes veranschaulicht den Winkelbereich, in dem die Magnetisierungsvektoren homogen verteilt sind. So zeigt beispielsweise *b* die Verteilung bei einer bestimmten Erregung  $H_b$ .

Hierbei ist  $n(\vartheta) = \text{konst.}$  von  $\vartheta = 0^\circ$  bis  $45^\circ$  und  $\vartheta = 315^\circ, 360^\circ$  und  $n(\vartheta) = 0$  von  $\vartheta = 45^\circ, 315^\circ$ . Die Magnetisierungsänderung eines Ferromagnetikums kann nach heutiger Vorstellung durch den Ablauf von zwei wesentlich verschiedenen Vorgängen zustande kommen, und zwar durch Wandverschiebung und Drehung [5].

Der erste Vorgang tritt bei kleineren Werten des Erregungsfeldes ein, wobei  $180^\circ$ - und  $90^\circ$ -Wandverschiebungen, die reversibel und irreversibel ablaufen, zu unterscheiden sind.



Um ein Bild über die Längenänderungen beim Magnetisieren eines Ferromagnetikums zu gewinnen, ist es erforderlich, ein Gesetz über den Ablauf der erwähnten Einzelvorgänge bei Magnetisierungsänderungen anzunehmen. Aus Gründen der Einfachheit wird zunächst vorausgesetzt, daß, ausgehend vom Entmagnetisierungszustand, die  $180^\circ$ -Übergänge zuerst ablaufen (Abb. 9 d, a). Die Magnetisierung des Objektes steigt damit auf den Wert  $I = 0,5 I_s$ . Wegen des  $\cos^2 \vartheta$ -Gesetzes tragen die  $180^\circ$ -Übergänge zur Magnetostriktion nichts bei, also ist bei diesem Magnetisierungswert  $\lambda = 0$ . Mit zunehmender Erregung setzen  $90^\circ$ -Übergänge und

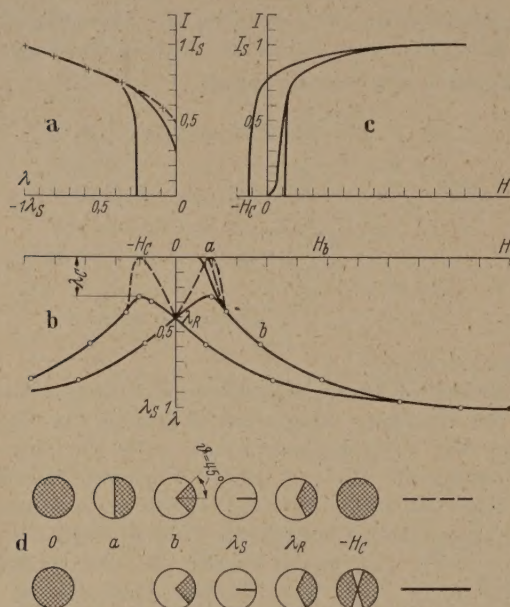


Abb. 9. Die isotrope Längsmagnetostraktion als Funktion der Magnetisierung  $I$  (Kurve a) und des Erregungsfeldes  $H$  (Kurve b) bei freigelegter Magnetisierungskurve  $I(H)$  gemäß c. Zur Berechnung wurden weitgehende Vereinfachungen bezüglich der Verteilung  $n(\vartheta)$  angenommen; schematische Darstellung Teilbild d für einzelne spezielle Fälle (O: ideale Ausgangszustand, a: bei  $I = 0,5 I_s$ ,  $\lambda_s$ : Sättigung,  $\lambda_R$ : Remanenz,  $-H_c$ : Koerzitivkraft). Die schraffierte Fläche deutet den Winkelbereich von  $\vartheta$  an, in dem  $n(\vartheta)$  konstant ist entlang einem Großkreisschnitt der Verteilungskugel in Richtung des Erregungsfeldes. Bei der gestrichelten Kurve ist vorausgesetzt, daß  $n(\vartheta)$  bei einem und demselben Magnetisierungswert identisch ist. Bei der ausgezogenen Kurve wurde diese Annahme nicht gemacht.

Drehungen ein. Hierbei können die  $90^\circ$ -Übergänge irreversibel ablaufen, jedoch Drehungen mit größter Wahrscheinlichkeit nicht. Die unter diesen Vereinfachungen berechnete Magnetostriktion ist als Funktion der Magnetisierung in Abb. 9a dargestellt. Auf der Ordinate ist die Magnetisierung, auf der Abszisse die Magnetostriktion aufgetragen. Das Vorzeichen von  $\lambda_s$  ist willkürlich negativ gewählt.

Ist die Magnetisierung als Funktion des äußeren Feldes  $H$  bekannt, so ist es möglich, auch die Magnetostriktion als Funktion von  $H$  aufzutragen. In Abb. 9b ist bei freigelegter Magnetisierungskurve gemäß 9c die durch Konstruktion ermittelte Magnetostraktionskurve als Funktion von  $H$  dargestellt (gestrichelt). Die Konstruktion ist leicht durchzuführen. Man braucht nur bei bekannter Magnetisierung  $I$  entsprechende  $H$ - und  $\lambda$ -Werte abzulesen und den Koordinatenachsen zuzuordnen. Die Magnetostriktion weist Hysterese als Funktion von  $H$  auf. Es ist eine Neukurve sowie gesonderter ab- und aufsteigender Ast vorhanden. Bei der Erregung  $H=0$  bleibt eine Restmagnetostriktion  $\lambda_R$

zurück. Der aufsteigende Ast erreicht im Gebiet Koerzitivkraft ein Maximum.

Vergleicht man die auf diese Weise theoretisch ermittelte Magnetostraktionskurve mit der experimentell gefundenen (Nickel), so zeigen beide einen ähnlichen Verlauf. Eine merkliche Abweichung ist im Gebiet der Koerzitivkraft vorhanden. Die theoretisch bestimmte Kurve erreicht bei der Erregung  $H = -H_c$  den Wert  $\lambda = 0$ ; experimentell ist dagegen  $\lambda = 0$ . Eine quantitative Ermittlung der Magnetostraktion auf theoretischer Basis ist mit erheblichen Schwierigkeiten verbunden, da das Gesetz, das den Ablauf der Magnetisierungsvorgänge bestimmt, noch zu wenig bekannt ist. Es ist nur qualitativ abzuschätzen, welchen Änderungen der Magnetostraktion unterliegt, wenn die Magnetisierungsvorgänge anders als vorstehend angenommen verlaufen.

Die Reihenfolge der Magnetisierungsvorgänge, die gleiche, wie vorstehend beschrieben, sein, zuerst sollen die  $180^\circ$ -, danach die  $90^\circ$ -Übergänge einsetzen und anschließend Drehungen beginnen wird jedoch vorausgesetzt, daß die  $180^\circ$ - und  $90^\circ$ -Übergänge in einem gewissen Bereich des Erregungsfeldes simultan ablaufen. Dies bedingt, daß bei der Magnetisierung  $I < 0,5 I_s$  Längenänderungen in Erscheinung treten. Im Gebiet der Koerzitivkraft sind erhebliche Abweichungen zu erwarten. Bei der Magnetisierung  $I = I_R$  verbleibt eine remanente Magnetostriktion  $\lambda_R$ . Bei entgegengesetzter Erregung laufen  $180^\circ$ - und  $90^\circ$ -Übergänge nebeneinander ab. Dies bewirkt, daß die Magnetisierung erheblich schneller dem Entmagnetisierungszustand zustrebt, als der Stab seiner Anfangslänge. Bei Erregung  $H = -H_c$  ist die Magnetisierung  $I$  geworden. Nimmt man an, daß die Verteilungsfunktion  $n(\vartheta)$  bei der Erregung  $H = -H_c$  anders ist als beim jungfräulichen Anfangszustand, so kennt man, daß eine bleibende Längenänderung koerzitive Magnetostriktion  $\lambda_c$  vorhanden ist.

Die unter diesen Erweiterungen zu erwartende Magnetostraktion ist in Abb. 9a und 9b eingezeichnet (ausgezogene Linie). Es ist zu erkennen, daß die Magnetostraktion als Funktion der Magnetisierung eine merkliche Hysterese — entsprechend der Hysterese der Magnetisierungskurve — aufweisen kann. Bei den experimentellen Befunden — aufweisen kann. Bei den angestellten Überlegungen wurden die Sättigungsmagnetisierung und -magnetostraktion als Bezugsgrößen gewählt. Die Sättigungsmagnetisierung ist gut definiert; dagegen ist die Sättigungsmagnetostriktion weitgehend vom jeweiligen Entmagnetisierungszustand abhängig, wie das aus der Definitionsgleichung

$$\lambda_s = \frac{l_{sätt} - l_{ent}}{l_{ent}}$$

ersichtlich ist, worin  $l_{sätt}$  und  $l_{ent}$  die Längen bei Sättigung und Entmagnetisierung bedeuten. Bei der Sättigungsmagnetisierung ist die Orientierung der Weiss'schen Bezirke eindeutig, so daß auch die Länge  $l_{sätt}$  gut definiert ist. Der Entmagnetisierungszustand ist hergestellt, wenn jeweils zwei Bereiche bzw. Bereichskomplexe gleichen magnetischen Moments antiparallele Lage der spontanen Magnetisierungsvektoren aufweisen. Infolge dieser Bedingung ist die Verteilungsfunktion  $n(\vartheta, \varphi)$



llig beschrieben. Es ist weiterhin zu beachten, daß  $n(\vartheta, \varphi)$  bei der Erregung  $H=0$  eine Funktion der Kristall- und Spannungsenergie ist, die von der mechanischen und thermischen Vorbehandlung abhängt. So leuchtet ein, daß die Länge  $l_{ent}$  nach dem Entmagnetisieren im monoton abnehmenden Magnetfeld anders ist, als z. B. nach Ausglühen oder nach Entmagnetisierung im Augenblick der Kompensation der Koerzitivkraft im langsam pendelnden Magnetfeld, wie das bei der Aufnahme der Magnetostraktionskurve der Fall ist. Demzufolge ist die Länge  $l_{ent}$  keine feststehende Bezugsgröße der Magnetostraktion.

Bei theoretischen Betrachtungen pflegt man immer den idealen Fall anzunehmen, daß die Beugungsdichte auf der Verteilungskugel bei der Entmagnetisierung konstant ist. Die Sättigungsmagnetostraktion, die diesem Entmagnetisierungszustand entspricht ( $\lambda_{is}$ ), kann erheblich von dem experimentell ermittelten Wert abweichen. Es läßt sich beweisen, daß bei der isotropen Magnetostraktion  $\lambda_s$  in dem Intervall zwischen 0 und  $5\lambda_{is}$  liegen muß. Diese Grenzfälle sind durch größere mechanische Beanspruchung zu erreichen (Druck oder Zug).

Will man die Meßwerte der Magnetostraktion von verschiedenen Objekten untereinander vergleichen, so ist erforderlich, alle auf ein und denselben Entmagnetisierungszustand zurückzuführen. Die Rückführung auf den idealen Ausgangszustand ist durchführbar, wenn die Differenz zwischen Längs- und Quermagnetostraktion  $\lambda_k$  bekannt ist; zwischen  $\lambda_{is}$  und  $\lambda_k$  besteht die Beziehung

$$\lambda_{is} = \frac{2}{3} \lambda_k.$$

Die Bestimmung von  $\lambda_k$  muß neben der Sättigungsmagnetostraktion  $\lambda_s$  in der Längsrichtung auch die Querrichtung  $\lambda_q$  bekannt sein. Diese Werte müssen gleichzeitig gemessen werden.

Bisher liegen noch keine Messungen von  $\lambda_k$  bei polykristallinem Nickel vor, dessen Magnetostraktion praktisch als isotrop angesehen werden kann. Es ist aber möglich, diese wichtige Größe auf indirektem Wege zu bestimmen. Wie aus Untersuchungen von RECHNER [6] hervorgeht, ist die Sättigungsmagnetostraktion von weichem Nickel bei einer Zugspannung  $\sigma = 10,4 \text{ kg} \cdot \text{mm}^{-2}$  in Richtung des Durchflutungsvektors  $\lambda_s = -60 \cdot 10^{-6}$ . Mit weiter zunehmender Belastung wurde keine Zunahme der Magnetostraktion beobachtet.

Die Abhängigkeit von der Zugspannung bewirkt, daß sich bei Nickel die spontanen Magnetisierungsvektoren der WEISSschen Bezirke normal zum Zug einstellen. Damit ist die Verteilungsfunktion  $n(\vartheta, \varphi)$  bei der Entmagnetisierung eindeutig definiert und stellt einen gesonderten Grenzfall dar. Drehen sich die WEISSschen Vektoren in die Richtung des Zuges, so ist die beobachtete Sättigungsmagnetostraktion mit dem  $\lambda_k$ -Wert identisch — er ist also bei Nickel  $\lambda_k = -60 \cdot 10^{-6}$ . Hieraus folgt, daß die Sättigungsmagnetostraktion bei Nickel, dessen Ausgangszustand dem idealen Fall entspricht,  $\lambda_{is} = 40 \cdot 10^{-6}$  ist. Gemäß Überlegungen von BECKER [7] ist die zu erwartende Sättigungsmagnetostraktion

des polykristallinen Nickels bei idealen Ausgangsbedingungen  $\lambda_s = -34 \cdot 10^{-6}$ .

Aus den angestellten Betrachtungen folgt, daß die Magnetostraktion rechnerisch zu verfolgen ist, wenn man die Verteilungsfunktion  $n(\vartheta, \varphi)$ , den Ablauf der Magnetisierungsvorgänge und die durch die unterschiedlichen Magnetisierungsvorgänge bewirkten Längenänderungen kennt. Man kann sich auch umgekehrt aus der experimentell ermittelten Magnetostraktionskurve über die abgelaufenen Magnetisierungsvorgänge ein Urteil bilden, wobei es vorteilhaft ist, die experimentell ermittelte Magnetostraktionskurve in Komponenten zu zerlegen.

Die Längenänderungen werden, wie bereits erwähnt, durch 90°-Übergänge und Drehungen hervorgerufen. Die 90°-Übergänge können reversibel und irreversibel ablaufen. Die relativen Längenänderungen, die durch die irreversiblen 90°-Übergänge bewirkt werden, sind der zweiten Komponente, die im experimentellen Teil dieser Arbeit als Remanenzkomponente bezeichnet wurde, zu entnehmen. Ihr Verlauf zeigt, wie die irreversiblen 90°-Übergänge in Abhängigkeit vom Erregungsfeld ablaufen.

Die Anzahl der irreversiblen 90°-Übergänge die in einem Ferromagnetikum stattfinden, ist begrenzt, während reversible Prozesse asymptotischen Verlauf aufweisen. Daraus folgt, daß die zweite Komponente einem Sättigungswert zustreben muß, was auch experimentell bestätigt wird (Abb. 5).

Bei entgegengesetzter Erregung ist zu erkennen, daß ein Teil von 90°-Übergängen, die bei der Erregung  $H=0$  noch irreversibel waren, wieder ihre Richtung ändern. Dies wird durch die Einsattelung der Remanenzkurve gekennzeichnet. Ist keine Einsattelung vorhanden, so setzen bei antiparallelen Erregungsvektoren nur irreversible 180°-Übergänge ein.

Die erste Komponente folgt aus den durch reversible 90°-Übergänge und Drehungen bewirkten Längenänderungen. Ihre Definitionsgleichung lautet

$$\lambda_1 = \frac{l_n - l_R}{l_{ent}},$$

worin  $l_n$  und  $l_R$  die Länge bei der Erregung  $H_n$  und  $H=0$  ist. Sie kann bei ein und demselben Material entweder negativ oder positiv sein, je nachdem  $l_n < l_R$  oder  $l_n > l_R$  wird. Die remanente Länge  $l_R$  ist von der magnetischen Vorgeschichte abhängig, wie aus der zweiten Komponente ersichtlich. Sie kann zu- oder abnehmen bzw. konstant bleiben. Im Gebiet der Koerzitivkraft laufen bei entgegengerichteter Erregung die irreversiblen 90°-Übergänge so ab, daß  $l_R$  dem Entmagnetisierungswert  $l_{ent}$  zustrebt. Wird die Erregung  $H > H_C$ , so strebt die Länge  $l_R$  wieder ihrem Sättigungswert zu. Beachtet man noch, daß jeder irreversible Übergang anfänglich reversibel war, so ist ohne weiteres klar, daß die erste Komponente im Gebiet der Koerzitivkraft das Vorzeichen wechselt. Dies ist sehr deutlich bei Nickel zu beobachten. Bei starker Erregung ist die erste Komponente negativ, d. h.  $l_n < l_R$ . Im Gebiet der Koerzitivkraft ist sie bei entgegengerichteter Erregung dagegen positiv, d. h.  $l_n > l_R$ . Bei der Erregung  $H_n = H_C$  ist die Länge  $l_n = l_R$  und damit auch  $\lambda_1 = 0$ . Bei weiter steigender Erregung wird die erste Komponente bei Nickel wieder negativ, weil die Magnetisierung wächst.



Auf Grund dieses Sachverhalts kann man auch die widersprechenden experimentellen Ergebnisse über den Vorzeichenwechsel bei der Magnetostraktion von Nickel richtig deuten. DIETSCH [8] hat zuerst angegeben, daß die Magnetostraktion von Nickel im Gebiet der Koerzitivkraft positive Werte annimmt. KERSTEN [9] behandelte diese Frage theoretisch und konnte das Experiment bestätigen. In einer späteren Arbeit von KIRCHNER [6] wurden die Beobachtungen von DIETSCH nicht bestätigt, sondern als Versuchsfehler angesehen.

Auf Grund der durchgeführten Betrachtungen ist es verständlich, daß die Magnetostraktion von Nickel im Gebiet der Koerzitivkraft höchstens den Wert null erreichen kann; sie nimmt aber keine positiven Werte an, was mit KIRCHNERS Gedankengängen übereinstimmt. Betrachtet man statt der Gesamtschleife nur die erste Komponente, so sind bei Nickel die positiven Werte bei genügend empfindlicher Meßanordnung beobachtbar.

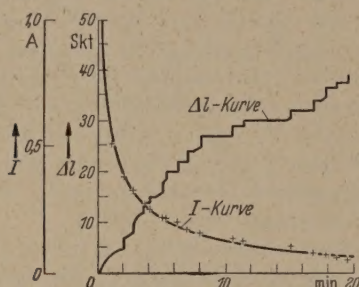


Abb. 10. Diskontinuierlicher Verlauf der Magnetostraktion bei abnehmendem Feld.

DIETSCH hat scheinbar denselben Nullpunktfehler begangen, der A. SCHULZE [10] unterlaufen ist, wodurch der Beitrag der zweiten Komponente nicht in Erscheinung tritt. Die von ihm angegebenen Magnetostraktionskurven könnte man somit auf die erste Komponente bezogen denken.

Um die Hysterese der ersten Komponente zu deuten, ist es notwendig, die reversiblen Magnetisierungsvorgänge in zwei Gruppen zu unterteilen. Unter der ersten Gruppe sollen alle reversiblen Vorgänge verstanden werden, die einen irreversiblen Vorgang einleiten. Die reversibel bleibenden Vorgänge bilden die zweite Gruppe. Diejenigen Längenänderungen, die der ersten Gruppe zugehören, treten so lange auf, bis die zweite Komponente ihren Sättigungswert erreicht. Die zweite Gruppe ist durch reversible Vorgänge gekennzeichnet, deren Anteil bei schwacher Erregung gering ist. Mit wachsendem Feld tragen nur noch diese Vorgänge zur Längenänderung bei.

Da bei absteigendem Ast der Kurve der ersten Komponenten (Abb. 4) beide Gruppen wirksam sind, beim aufsteigenden Ast nur die zweite Gruppe für Längenänderungen verantwortlich ist, erklärt sich hieraus ein von einander abweichender Verlauf der Äste (Hysterese).

Theoretisch ist zu erwarten, daß die Hysterese der ersten Komponente bis zu dem Wert des Erregungsfeldes, bei dem die zweite Komponente ihre Sättigung erreicht, vorhanden ist. Praktisch beobachtet man dagegen die Hysterese der ersten Komponente nur in unmittelbarer Umgebung der

Koerzitivkraft. Dies ist dadurch zu erklären, daß sich die Längenänderungen, die durch die erste Gruppe der reversiblen Magnetisierungsvorgänge hervorgerufen werden, so verringern, daß die Genauigkeit nicht mehr ausreicht, um sie mit Sicherheit festzustellen.

Der dritten Komponenten entnimmt man, daß die Länge bei ein und demselben Wert des Erregungsfeldes unterschiedlich sein kann. Der Befund, daß bei gleichen Feldstärken zwei unterschiedliche Längen ermittelt werden, ist nur durch zwei unterschiedliche Verteilungsfunktionen deutbar. Das ist folgendermaßen zu verstehen. Mit wachsender Erregung laufen die 90°-Übergänge ab. Bei abnehmender Erregung verweilen die Magnetisierungsvektoren nächst in dieser Lage. Sie erreichen erst dann eine rückläufige Tendenz, wenn das Erregungsfeld genügend kleine Beträge angenommen hat.

#### *Diskontinuierlicher Verlauf der Magnetostraktion bei abnehmendem Feld.*

Bei kontinuierlich abnehmender Erregung wurde festgestellt, daß die Magnetostraktion bei Nickel kontinuierlich verläuft. Um diesen Effekt zu untersuchen, wurde ein elektrolytischer Widerstand zwecks stufenloser Stromänderung verwendet. Konstruktion des Widerstandes wurde so vorgenommen, daß die kontinuierliche Änderung des Erregungsfeldes automatisch erfolgte.

In Abb. 10 sind die Ergebnisse der Magnetostraktion bei kontinuierlicher Stromänderung wiedergegeben. Auf der Abszisse ist die Zeit, auf der Ordinate sind Längenänderung und Ströme aufgetragen. Das Diagramm zeigt, daß sich vollkommen regelrechte Sprünge ergeben.

Man könnte auf die Vermutung kommen, daß die ermittelten Sprünge im Verlauf der Magnetostraktionskurve auf sprunghaft eintretende Anzeigen der Kapillarmeißrichtung zurückzuführen sind. Zur Sicherung des experimentellen Befundes wurde ein Kontrollversuch mittels thermischer Längenänderungen angestellt, daß sich der untersuchte erwärmte Stab in der Meißrichtung abkühlte und die Längenabnahme als Funktion der Zeit bestimmt wurde. Hierbei ergab sich völlig kontinuierlicher Verlauf der Längenänderung.

Die diskontinuierliche Längenabnahme deutet darauf hin, daß bei genügend kleiner Erregung sehr viele 90°-Übergänge labil geworden sind. Es genügt eine kleine Störung, z. B. ein einziger Übergang irgendwo einer Stelle des Objekts, um eine Lawine von 90°-Übergängen einzuleiten. Die lawinenartig verlaufenden 90°-Übergänge bewirken die sprunghaften Änderungen. Die Messung zeigt, daß 90°-Übergänge sprunghaft ablaufen wie 180°-Übergänge, die BARKHAUSEN-Sprünge bekannt sind.

#### *Zusammenfassung.*

Auf Grund des Sachverhalts, daß beim Magnetisieren eines Ferromagnetikums nebeneinander unterschiedliche Prozesse ablaufen (reversible und irreversible), sind gekoppelte Einwirkungen auf die Längenänderung (Längsmagnetostraktion) zu vermuten, so daß der Verlauf der Magnetostraktion eine Synthese aus Einzelvorgängen darstellt.



perimentell wird gezeigt, daß dies tatsächlich der Fall ist.

Es gelingt, drei Einzelvorgänge aufzunehmen, die — superponiert — den Gesamtkurvenzug nach NAGAOKA ergeben. Die drei Komponenten können, wenn ermittelt wird, je nach Remanenz und Koerzitivkraft des untersuchten Materials sehr unterschiedlichen Verlauf zeigen. Eine unter vereinfachenden Annahmen aufgestellte Verteilungsfunktion der Ausdehnung der WEISSschen Momente unter dem Einfluß des äußeren Feldes gestattet eine befriedigende Deutung des experimentellen Befundes.

Weiterhin wird ermittelt, daß eine diskontinuierliche Längenänderung des Meßobjektes im Bereich der Koerzitivkraft bei abnehmender magnetischer Durchflutung eintritt.

Den Firmen *Deutsche Edelstahlwerke AG.*, Krefeld und *Widia-Fabrik*, Essen danken wir für die freundlicherweise zur Verfügung gestellten Untersuchungsmaterialien verbindlichst.

**Literatur.** [1] JOULE, J. P.: *Phil. Mag.* **30**, 76, 225 (1847). — [2] NAGAOKA, H.: *Phil. Mag.* **37**, 131 (1894); *Ann. Phys.* **53**, 487 (1894). — [3] DÖRING, W.: *Z. Phys.* **103**, 560 (1936). — [4], [5], [7] BECKER, R. u. W. DÖRING: *Ferromagnetismus*, Berlin 1939; S. 142, 105, 278—279. — [6] KIRCHNER, H.: *Ann. Phys.* **27**, 49 (1936). — [8] DIETSCH, G.: *Z. techn. Phys.* **12**, 380 (1931). — [9] KERSTEN, M.: *Z. Phys.* **72**, 500 (1931). — [10] SCHULZE, A.: *Z. Phys.* **50**, 448 (1928). — [11] SCHULZE, A.: *Ann. Phys.* **11**, 937 (1931).

Dipl. Phys. E. BAILITIS, Prof. Dr. habil. C. HAGEN und Dr. H. H. RUST.

Institut für Angewandte Physik der Universität Hamburg, (24a) Hamburg 36, Jungiusstr. 4.

## Röntgenblitzuntersuchungen bei nichtidealen Detonationswellen\*.

Von RUDI SCHALL, Weil/Rh.

Mit 3 Textabbildungen.

(Eingegangen am 21. April 1952.)

### A. Nichtideale Detonation und ihre Theorien.

Die in der Front einer Detonationswelle gezündete chemische Umsetzung des Sprengstoffes nimmt eine wohl sehr kleine, aber in Anbetracht der großen Detonationsgeschwindigkeit (DG) merkbare Zeit in Anspruch, so daß die Reaktionszone, deren Länge wir zunächst als Abstand zwischen Detonationsfront und der Fläche abgeschlossener Umsetzung definieren, eine endliche Ausdehnung besitzt. In den älteren Detonationstheorien [1], [2], [3] wird diese Länge wegen der Sprengkörperdimensionen vernachlässigt. Abgesehen davon, daß in der Praxis diese Voraussetzung keineswegs immer erfüllt ist, wird eine solche realisierte Theorie auch aus dem von ihr beherrschten Erscheinungskomplex keine Aussagen über die Beschaffenheit der Umsetzungszone machen können. Nun ist die Reaktionszonlänge aber eine zur Charakterisierung eines Sprengstoffes äußerst wichtige Kenngröße, bestimmt sie doch die minimalen Sprengstoffdicken und Ladungsdurchmesser, bei denen noch eine volle DG zu erwarten ist, ferner die Geschwindigkeit, mit der sich bei Über- oder Unterinitiiierung die detonierende DG einstellt. Auch die Empfindlichkeit wird in weitem Maße von dieser Kenngröße bestimmt.

In Anlehnung an die amerikanische Literatur wollen wir Detonationsvorgänge, bei denen die endliche Länge der Reaktionszone eine wesentliche Rolle spielt, als *nicht ideal* bezeichnen. Ein Studium dieser Wellen ist also besonders im Hinblick auf die Möglichkeit einer indirekten Bestimmung von Reaktionszonlängen interessant, da eine direkte Messung wegen der bei festen Sprengstoffen außerordentlich hohen Reaktionsgeschwindigkeiten zunächst nicht möglich erscheint.

Das bekannteste Beispiel einer nichtidealen Detonationswelle bietet die dünne Sprengstoffstange, die bei Durchmessern, die mit der Reaktionszonlänge vergleichbar sind, mit unternormaler DG detoniert.

Obleich diese Tatsache schon BERTHELOT und VIEILLE [4] im Jahre 1881 bekannt war, lag bis vor kurzem keine physikalisch einwandfreie theoretische Erklärung vor. In den letzten Jahren sind über diesen Gegenstand nun gleich 2 Theorien bekannt geworden, die von etwas verschiedenen Vorstellungen über die physikalischen Bedingungen in der Reaktionszone

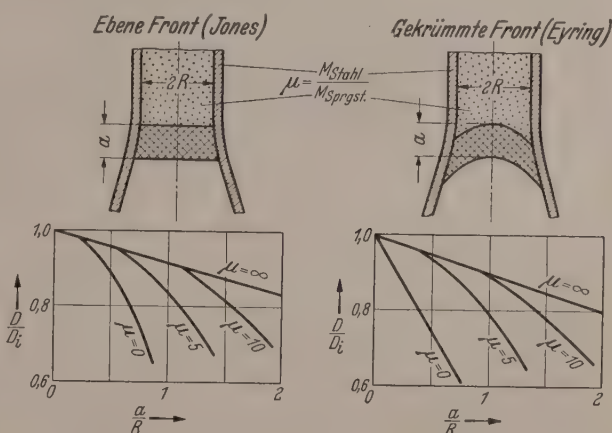


Abb. 1. Modelle und Resultate der Theorien der nichtidealen Detonation.

ausgehen. In Abb. 1 sind die diesen Theorien zugrundeliegenden Modelle und die daraus resultierenden Ergebnisse dargestellt.

H. JONES [5] betrachtet eine ebene Detonationsfront, in deren Reaktionszone (Länge  $a$ ) Verdünnungswellen eindringen. Die Stromlinien verlaufen dann nicht mehr streng axial, wie dies bei idealer Detonation der Fall ist, sondern erhalten eine radiale Komponente, deren Größe außer von  $a$  von der Expansionsgeschwindigkeit der äußersten Sprengstoffschicht, also von dem Verhältnis  $\mu$  der Hüllenmasse zur Sprengstoffmasse, abhängt. Daraus resultiert eine gegenüber der idealen Welle an der Kontinuitätsgleichung anzubringende Korrektur, die im Verein mit den anderen (aus der idealen Theorie unverändert übernommenen) Erhaltungssätzen die in

\* Diese Arbeit ist Herrn Prof. Dr.-Ing. SCHARDIN zu seinem 50. Geburtstag am 17. 6. 1952 gewidmet.



Abb. 1 dargestellte Verminderung der DG zur Folge hat.

EYRING und Mitarbeiter [6] berücksichtigen dagegen, daß das Eindringen der Verdünnungswellen in die Reaktionszone eine Krümmung der Detonationsfront zur Folge hat und berechnen die Abhängigkeit der DG vom Krümmungsradius. Sie betrachten die stationäre Form der Wellenfront, also diejenige Krümmung, die sich als Gleichgewichtszustand einstellt, wenn die seitliche Expansion keinen Einfluß auf die Fortpflanzungsgeschwindigkeit nehmen kann. Diese Krümmung, die von  $\alpha$  und  $\mu$  abhängt, bedingt die in der Abb. wiedergegebene Verringerung der DG.

Die Gegenüberstellung der Ergebnisse zeigt, daß beide Theorien qualitativ die gleiche Abhängigkeit der DG von den Sprengkörperdimensionen voraus-

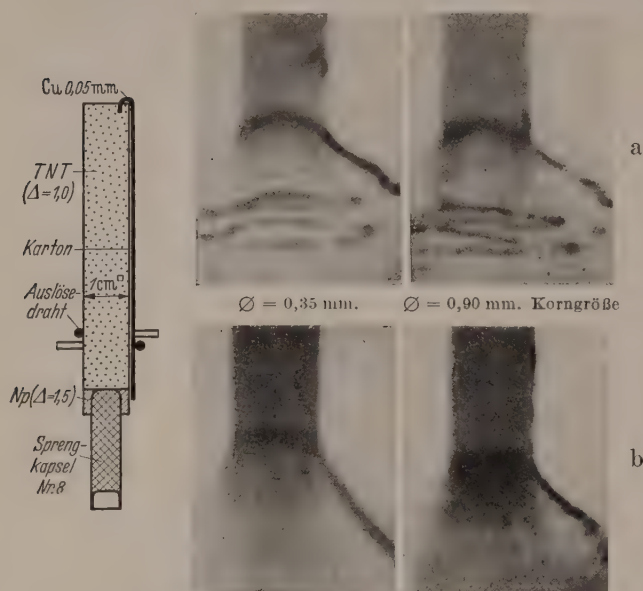


Abb. 2. Versuchssprengkörper und Röntgenaufnahmen von a frühen und b späten Stadien der Detonation bei verschiedenen Korngrößen.

sagen. Damit ergeben sich auch Werte gleicher Größenordnung für die Reaktionszonenlängen, wenn man die eine oder andere Theorie auf DG-Messungen anwendet. Da genaue Werte für Reaktionszonenlängen nicht bekannt sind, können DG-Messungen allein keinen Aufschluß darüber bringen, welche physikalischen Bedingungen in der Detonationsfront wirklich vorliegen, ob also die Voraussetzungen der Ebenen-Front-Theorie realisiert sind, oder ob tatsächlich eine Krümmung der Front eintritt<sup>1</sup>.

### B. Röntgenaufnahmen und Ergebnisse.

Für eine experimentelle Prüfung dieser Frage erscheint nun die Röntgenblitzphotographie sehr geeignet, wird doch im Röntgenbild nicht nur die Form der Wellenfront, sondern auch das gesamte Dichtefeld in der Umsetzungszone und den Schwaden registriert [8]. Die zu diesem Zweck benutzte Versuchsladung zeigt Abb. 2. Aus Gründen der Aufnahmetechnik sind nicht zylindrische, sondern quaderförmige Ladungen untersucht worden, was den Detonationsvorgang aber sicherlich nicht wesentlich

ändert. Als Sprengstoff wurde geschüttetes TNT der Ladedichte 1,0 von definierter Korngröße verwendet, das durch fraktionierte Siebung aus technischem Sprengstoff erhalten wurde. Um die Bewegung der Kartonhülle im Röntgenbild gut sichtbar zu machen, ist auf diese einseitig eine dünne Kupferfolie aufgeklebt worden. Die Zündung erfolgte durch eine Sprengkapsel in Verbindung mit einem kleinen Np-Preßling. Sprengung und Röntgenblitz wurden in der Weise synchronisiert, daß die Detonation einen stromdurchflossenen Draht zerreißt. Etwa 5–6  $\mu$  sec nach der Stromunterbrechung (inzwischen legt die Welle 2–3 cm zurück) wird der Röntgenblitz ausgelöst, dessen Belichtungszeit etwa  $10^{-7}$  sec beträgt. Je nach dem, ob wir den Auslösedraht unten an der Übertragungsladung oder in größerem Abstand darüber anbringen, registrieren wir ein frühes oder späteres Stadium der Detonation.

Die Röntgenbilder (Abb. 2) zeigen nun, daß in den Anfangsphasen, also nach Zurücklegung von 2–3 Ladungskalibern, die initiierte ebene Wellenfront noch gut erhalten ist. Hier sind also im wesentlichen die Voraussetzungen der JONESschen Theorie erfüllt. — Bemerkenswert ist das verhältnismäßig scharf begrenzte Gebiet erhöhter Schwärzung, also starker Verdichtung, hinter der Detonationsfront. Wir vermuten und werden unten begründen, daß dieses die Reaktionszone darstellt. Es ist deutlich erkennbar, wie sich die Länge dieser Zone mit zunehmender Korngröße des Sprengstoffes vergrößert. Man sieht auch, daß bei sehr grobem Korn der Abbrand der Sprengstoffkörner offensichtlich unvollständig bleibt, denn am Ende der Reaktionszone sind noch unverbrannte Körner sichtbar, die sich in den stark entspannten Schwaden in denen die Reaktionsgeschwindigkeit nur noch klein sein kann, bewegen. Dieses Bild macht besonders deutlich, daß wir es bei der Umsetzung kristalliner Sprengstoffe mit einem Kornabbrand zu tun haben.

In den Aufnahmen von späteren Phasen der Detonation ist dagegen eine deutliche Krümmung der Detonationsfront in der Form zu beobachten, wie sie die EYRINGsche Theorie voraussagt. Zweifellos sind also hier die Voraussetzungen dieser Theorie erfüllt, und es gibt diese Theorie die stabile Form der nichtidealen Detonationswelle an, in die eine ebene oder ander Form initiierte Welle stetig übergeht. Auch bei diesen Aufnahmen wird die Verlängerung der Reaktionszone mit der Korngröße deutlich, was sich in der Länge keine merklichen Unterschiede gegenüber ebenen Wellen ergeben.

Daß die Zone erhöhter Schwärzung hinter der Detonationsfront mit der Reaktionszone zusammenfällt, erklärt sich folgendermaßen: Der Abbau der Verdichtung ist hauptsächlich eine Folge der seitlichen Expansion, die wiederum im wesentlichen durch die Gasentwicklung, also den zeitlichen Ablauf der Umsetzung bedingt ist. Die Umsetzungsgeschwindigkeit ist aber innerhalb der Reaktionszone keineswegs konstant. Vielmehr zeigt die Theorie der Wärmeexplosion, daß zwischen dem Aufheizen eines Explosivkörpers über seine Explosionstemperatur — das geschieht in der Front der Detonationswelle — innerhalb einer Zone von wenigen freien Weglängen

<sup>1</sup> In einem späteren Diskussionsbeitrag [7] hat auch JONES darauf hingewiesen, daß eine Krümmung der Front auftreten müßte, ohne aber über diese quantitative Angaben zu machen.



dem Einsetzen einer Reaktion hoher Geschwindigkeit eine gewisse Induktionszeit liegt, innerhalb der die Umsetzung zunächst mit unmerklich kleiner, gegen Ende aber mit steil ansteigender Geschwindigkeit vor sich geht. Wir können also die Reaktionszone praktisch aufteilen in eine Induktionszone — diese wird im allgemeinen den überwiegenden Anteil ausmachen — und eine Zone der eigentlichen Umsetzung, in der sich Temperatur und Reaktionsgeschwindigkeit so lange gegenseitig steigern, bis durch starke Expansion oder Aufzehrung der Unverbrannten eine gegenläufige Tendenz eintritt. An dieser Stelle wird die Gasdichte stark abfallen. Gleichzeitig wird infolge der Änderung der Strömung die Summe  $a + u$  aus örtlicher Schallgeschwindigkeit und axialer Strömungsgeschwindigkeit in Detonationsrichtung, die hinter der Wellenfront größer als die  $DG$  ist, stark abfallen und die  $DG$  überschreiten. Es existiert also innerhalb oder am Ende der Reaktionszone im engeren Sinne eine Ebene, in der  $a + u = D$  ist. Diese als CHAPMAN-JOUQUET-Ebene bezeichnete Fläche hat nicht nur thematische Bedeutung. Ist die Reaktion dort abgeschlossen — und die Röntgenbilder zeigen, daß dies unter ungünstigen Verhältnissen der Fall sein kann —, so wird die Reaktion einmal in ihrer Geschwindigkeit stark verzögert, zum anderen die hinter der  $C-J$ -Ebene frei werdende Energie nicht mehr zur Aufrechterhaltung der Detonationswelle beitragen<sup>1</sup>. Wir können also die  $C-J$ -Ebene als die Detonationswelle maßgebliche Reaktion abschließend betrachten und zweckmäßig überhaupt die ursprüngliche Definition der Reaktionszonenzonenlänge modifizieren, daß diese den Abstand der  $C-J$ -Ebene von der Detonationsfront bedeuten soll. Gerade diesen Abstand beobachten wir aber röntgenographisch wegen des schnellen Dichteabfalls in der  $C-J$ -Ebene.

Es ist nun interessant, die Längen der Reaktionszone, die wir aus den Röntgenbildern direkt entnehmen können, mit den Werten zu vergleichen, die man aus  $DG$ -Messungen nach der Theorie errechnen kann. Abb. 3 sind die aus einer Reihe von Aufnahmen, wie sie Abb. 2 zeigt, entnommenen Werte zusammen mit den von EYRING nach seiner Theorie aus  $DG$ -Messungen berechneten eingetragen. Die rönt-

genographisch gemessenen Werte liegen etwas höher als die errechneten, jedoch sind die Differenzen innerhalb der Meßgenauigkeit. Unsere Aufnahmen können also als gute Bestätigung der Theorie angesehen werden.

Die Länge der Reaktionszone nimmt linear mit der Korngröße zu, behält aber für beliebige feine Körnigkeit einen endlichen Wert. Diese Mindestzonenzonenlänge (1 mm) dürfte wohl einer dem Sprengstoff eigentümlichen Induktionszeit zuzuschreiben sein, während die mit der Korngröße lineare Zunahme der Abbrandzeit entsprechen dürfte.

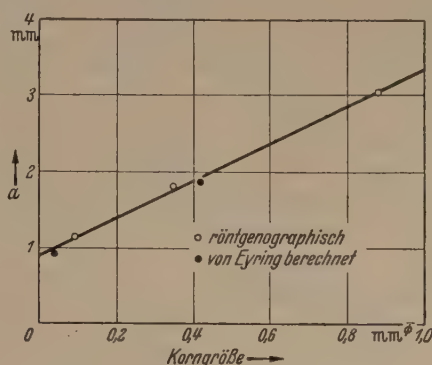


Abb. 3. Berechnete und gemessene Reaktionszonenzonenlängen für TNT.

### Zusammenfassung.

Eine als eben initiierte nichtideale Detonationswelle behält ihre ebene Front zunächst über mehrere Ladungsdurchmesser bei, so daß in gewissen Gebieten die Voraussetzungen der JONESSchen Theorie erfüllt sein können. Die stabile Form der nichtidealen Detonationswelle aber ist durch eine gekrümmte Front gekennzeichnet, wie sie die EYRINGsche Theorie voraussagt. Die nach dieser Theorie für TNT berechneten Reaktionszonenzonenlängen konnten direkt gemessen und bestätigt werden.

**Literatur.** [1] CHAPMAN, D.: Phil. Mag. 47, 90 (1899). — [2] JOUQUET, E.: Mécanique des Explosifs. Paris 1917. — [3] BECKER, R.: Z. Physik 8, 321 (1922). — [4] BERTELOT, M. et P. VIEILLE: C. R. 93, 18 (1881). — [5] JONES, H.: Proc. Roy. Soc. (London) A 189, 45 (1947). — [6] EYRING, H., R. E. POWELL, G. H. DUFFEY u. R. B. PARLIN: Chem. Rev. 45, 69 (1949). — [7] PENNEY, W. G. u. a.: Proc. Roy. Soc. (London) A 204, 9 (1950). — [8] SCHALL, R. u. G. THOMER: Z. angew. Physik 3, 41 (1951).

Dr. RUDI SCHALL, Weil am Rhein, Bühlstr. 16.

## Messung der Halbwertschicht bei ölisierten Röntgenröhren\*.

Von E. ZIELER.

(Mitteilung aus dem Laboratorium der C. H. F. Müller-A. G. in Hamburg-Fuhlsbüttel).

Mit 3 Textabbildungen.

(Eingegangen am 10. April 1952.)

### I. Einleitung.

Es ist in der Röntgentherapie allgemein üblich, die Qualität der benutzten Strahlung durch die Angabe ihrer Halbwertschicht (HWS) in gewissen Standardmaterialien zu beschreiben. Für den Bereich der Tiefentherapie bis 400 kV bezieht man

dabei die Angaben auf Kupfer, da dieses hier auch als Filtermaterial gebräuchlich ist.

Im Folgenden soll die Durchführung der HWS-Messung besprochen sowie ein besonderes Problem behandelt werden, das bei der Benutzung von ölisierten Röntgentherapieröhren auftritt.

\* Herrn Prof. Dr. H. G. MÖLLER zum 70. Geburtstag.



## II. Meßmethode.

Die HWS kann auf zwei Wegen ermittelt werden:

1. Man mißt die Dosisleistung der Röntgenanlage mit dem Arbeitsfilter und fügt dann so lange weitere Filter hinzu, bis das Dosimeter gerade die Hälfte des zuerst gemessenen Wertes anzeigt. Diese Methode ist recht bequem, wenn man den zu erwartenden Wert ungefähr schon kennt, jedoch nicht übermäßig genau, da alle Schwankungen des Apparates in die Messungen eingehen und schon kleine Fehler bei der Messung der Dosisleistung sich in der HWS deutlich bemerkbar machen.

2. Man mißt die Dosisleistung mit einer Anzahl Filter verschiedener Stärke, trägt die erhaltenen Werte graphisch als Schwächungskurve auf (zweckmäßig in semilogarithmischen Koordinaten) und bestimmt aus dieser Schwächungskurve die HWS.

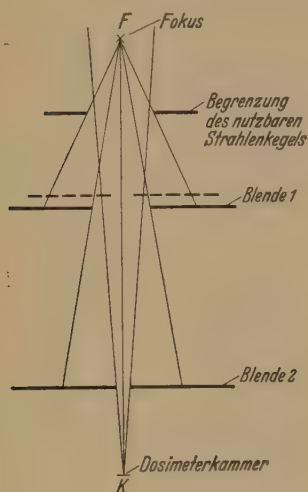


Abb. 1. Aufbau zur Messung der Haubenstreustrahlung.

Diese Methode ist genauer als die vorige, da beim Zeichnen der Schwächungskurve kleinere Schwankungen in der Ausbeute des Apparates ausgeglichen werden. Eine sehr hohe Genauigkeit kann man bei dieser Methode erreichen, wenn man einmal zwischen je 2 Meßpunkten einen Kontrollwert mißt, zum anderen den Röntgenapparat nicht aus dem Wechselstromnetz, sondern aus einem Aggregat betreibt, das von einer Synchronmaschine gespeist wird

und drittens die Konstanz der Strahlenausbeute während der ganzen Meßreihe mit Hilfe einer durchstrahlten Ionisationskammer überwacht.

Die Messungen wurden nach der unter 2. beschriebenen Methode an dem Tiefentherapie-Apparat „Müller RT 200“ durchgeführt, wobei alle erwähnten Vorsichtsmaßnahmen angewandt wurden. Zur Kontrolle der Konstanz der Strahlung war der Apparat mit dem dazugehörigen Röntgenwertmesser ausgerüstet [1].

Bekanntlich kann nun der geometrische Aufbau der Meßanordnung einen merklichen Einfluß auf das Meßresultat ausüben. Auch wenn man davon absieht, daß es u. U. notwendig sein kann, durch Begrenzung des Primärstrahles die Entstehung von störender Streustrahlung in der Umgebung zu verhindern, kann die Art der Ausblendung wegen der Stielstrahlung das Ergebnis beeinflussen [2]. Nach den obigen Bemerkungen ist ohne weiteres zu verstehen, daß diese Einflüsse bei der Messung der HWS besonders deutlich in Erscheinung treten werden. Aus diesem Grunde schreibt das DIN-Blatt 6809 in § 21 für die Messung der Härten vor, daß die Messungen im möglichst eng ausgeblendeten Strahlenbündel vorzunehmen sind.

Bei der Dosismessung muß man natürlich bemüht sein, alle Fehlerquellen zu beseitigen, die im Aufbau

der Meßanordnung selbst begründet sind. Eine solche Fehlerquelle stellt die Stielstrahlung jedoch nicht dar, da diese auch bei der Bestrahlung der Handen ist, d. h. mit zu der therapeutisch wirksamen Strahlung gehört. Bei der Ausblendung des Strahlenkegels für die Dosismessung muß man also darauf achten, daß der Teil der Stielstrahlung, der in einem Punkt des Bestrahlungsfeldes auftritt, auch vom Dosimeter erfaßt wird [2]. Röhren, deren Anode einem Elektronenfangkopf versehen ist, haben keine ins Gewicht fallende Stielstrahlung mehr, da durch das Strahlenaustrittsfenster im Anodenfangkopf nur Strahlung aus der unmittelbaren Umgebung des Brennflecks gelangen kann und es durch einen unverhältnismäßig großen experimentellen Aufwand möglich ist, diese Strahlung von der vom Brennfleck selbst herrührenden Strahlung trennen.

Bei den modernen ölisierten Röhrenhauben senden jedoch das durchstrahlte Öl und das Material des Haubenfensters Streustrahlung aus, so daß die Material wie eine räumlich ausgedehnte sekundäre Strahlenquelle wirkt. Diese Streustrahlung kann die Meßergebnisse in ähnlicher Weise beeinflussen, wie früher die Stielstrahlung. Der Anteil dieser Streustrahlung an der Gesamtstrahlung hängt von der Menge der durchstrahlten Materie ab, wird sich bei verschiedenen Haubenkonstruktionen unterscheiden. Er wird um so größer sein, je dicker die Schicht Isolieröl, je dicker das Strahlenaustrittsfenster und je größer der Öffnungswinkel wird, der dem Strahlung in das Feld bzw. in die Dosimeterkammer gelangen kann. Daß er bei großem Öffnungswinkel bzw. Bestrahlungsfeldern beträchtlich sein kann, erkennt man ohne weiteres aus der Tatsache, daß Strahlungen mit Halbwertschichten über 1 mm Kupfer in 10 mm Isolieröl um etwa 15% geschwächt werden. Die Schwächung ist hier praktisch von der Härte unabhängig, d. h. sie ist fast ausschließlich auf Streustrahlung zurückzuführen. Diese in der Haube stehende Streustrahlung muß natürlich bei der Messung sowohl der Quantität (Dosisleistung) als auch der Qualität (Strahlenhärte, HWS) im Bestrahlungsfeld mit erfaßt werden. Die vorstehenden Ausführungen lassen jedenfalls erkennen, daß man sich sicher nicht von vornherein sagen kann, daß ihr Einfluß vernachlässigbar sein wird.

Eine meßtechnisch saubere Trennung der direkten Fokusstrahlung von der Haubenstreustrahlung mit der in Abb. 1 schematisch dargestellten Meßanordnung möglich. Zwischen dem Fokus und der Dosimeter befinden sich mehrere Blenden. Es zeigt sich nun, daß der Meßwert der Dosisleistung nur von der Größe und der Lage derjenigen Blende abhängt, die, von der Kammer aus gesehen, den Winkel der Haube hin begrenzt. Bei der in der Abbildung gezeigten Anordnung kann man also die Blende 1 überhaupt fortlassen, ohne daß die Dosimeteranzeige sich ändert. Hat Blende 1 jedoch die gestrichelte Lage und Größe, so ändert sich die Dosimeteranzeige, wenn man sie fortnimmt, während jetzt die Blende 2 keinen Einfluß hat. (Natürlich muß dabei vorausgesetzt werden, daß nach Wegnahme der Blende nicht Streustrahlung von außerhalb der Haube befindlichen Gegenständen oder Bestrahlung des ganzen Dosimeters die Anzeige fälschen.)



Die Messungen wurden zur Erreichung der größtmöglichen Genauigkeit mit dem großen KÜSTNERSchen Messstandsgerät durchgeführt, jedoch ergibt auch eine Messung mit einer Fingerhutkammer an einem momentan-Dosimeter innerhalb der Fehlergrenzen des Dosimeters dieselben Werte.

### III. Meßergebnisse.

Bei den Messungen betrug der Fokus-Kammerabstand 49 cm, der Abstand der Blende von der Kammer 19 cm (nachdem die Verhältnisse geklärt waren, wurde für die endgültigen Messungen nur eine Blende im Strahlengang angebracht). Abb. 2 zeigt, in semilogarithmischen Koordinaten, die mit verschiedenen großen Blenden gemessenen Kupfer-Schwächungskurven (Röhrenspannung 200 kV, Röhrenstrom 20 mA). Infolge der oben beschriebenen Maßnahmen zur Konstanthaltung der Strahlenscharkeitsbeute konnten die relativen Meßfehler bei mehrfacher Wiederholung der Meßreihe unter  $\pm 0,2\%$  gehalten werden. Es wurden gemessen:

|                                |        |
|--------------------------------|--------|
| Kurve 1 mit Blendendurchmesser | 1,0 cm |
| „ 2 „ „                        | 1,8 „  |
| „ 3 „ „                        | 2,8 „  |
| „ 4 „ „                        | 4,1 „  |

Die in der Schwächungskurve 4 angegebenen Werte der Dosisleistung enthalten die gesamte Streustrahlung, die überhaupt aus dem Haubeninneren in die Dosismesskammer gelangen kann. Die Werte der Kurve 4 ergeben sich also auch bei Benutzung von Blenden mit größerem Durchmesser als 4,1 cm. Bei der Messung mit größeren Blenden ist natürlich besonders darauf zu achten, daß keine Streustrahlung von Gegenständen außerhalb der Haube in die Ionisationskammer gelangen kann.

Blenden mit kleinerem Durchmesser als 1,0 cm wurden nicht benutzt, da dann die Justierung sehr kritisch geworden und schließlich nicht mehr zu entscheiden gewesen wäre, ob die Abnahme der Dosisleistung auf die Unterdrückung der Streustrahlung oder auf etwaiges Abscheiden des vom Fokus direkt hervorgehenden Strahlenkegels zurückzuführen wäre. Bei der kleinsten benutzten Blende ist in der gewählten Anordnung ihre Projektion von der Kammer in die Haube gerade noch etwas größer als das Strahleneintrittsfenster im Anodenfangkopf, so daß die Strahlung von der Anode kommende Strahlung auf jeden Fall von der Messung voll erfaßt wird. Durch graphische Extrapolation auf den Blendendurchmesser 0 cm muß sich dann die von der direkten Strahlung hervorgehende Dosisleistung ergeben. Diese Werte sind in Kurve 0 in Abb. 2 eingetragen.

### IV. Diskussion und Deutung der Meßwerte.

Wie zu erwarten, liegen die mit kleineren Blenden gemessenen Kurven niedriger als die mit größeren Blenden gemessenen, da ja mit abnehmendem Blendendurchmesser ein zunehmender Bruchteil von Streustrahlung aus der Haube nicht mehr in die Meßkammer gelangen kann.

Es gibt nun bekanntlich drei Elementarvorgänge, die eine Zerstreung der Röntgenstrahlen bewirken:

1. Kohärente Streuung: Die gestreute Strahlung hat die gleiche Wellenlänge wie die primäre.

2. COMPTON-Effekt: Die gestreute Strahlung hat eine größere Wellenlänge als die primäre.

3. Anregung der Eigenstrahlung (Fluoreszenz): Die gestreute Strahlung hat eine größere Wellenlänge als die primäre.

Die Fluoreszenzstrahlung braucht in dem vorliegenden Fall nicht berücksichtigt zu werden, da sie bei dem niederatomigen Streukörper so weich ist, daß sie schon in einer dünnen Luftschicht praktisch vollständig absorbiert wird.

Von den anderen beiden Vorgängen tritt der COMPTON-Effekt immer mehr in den Vordergrund, je kürzer die Wellenlänge der Strahlung ist. Die Streustrahlung wird also relativ um so weicher, je härter die Primärstrahlung ist. (Bei einer Primär-

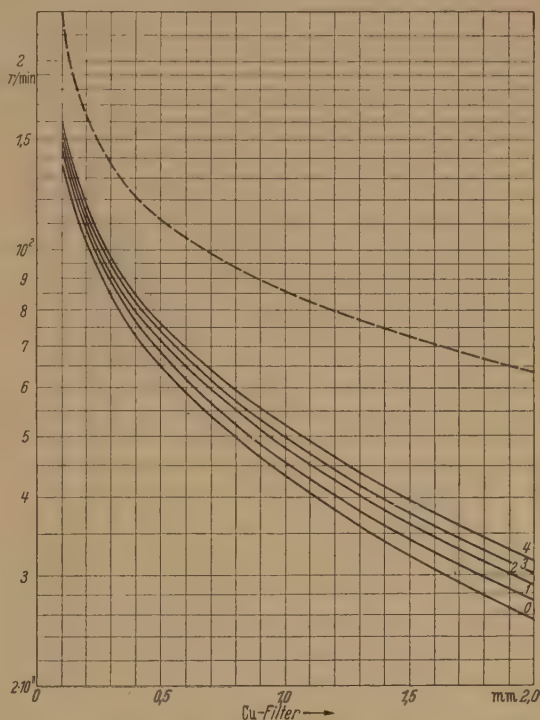


Abb. 2. Cu-Schwächungskurven bei verschiedenen Ausblendungen  
200 kV; 20 mA; 50 cm Fokus-Kammer-Abstand  
(Erläuterungen siehe Text.)

strahlung von 100 kV entspricht die Härte der senkrecht zur Primärstrahlung gestreuten Strahlung etwa der einer von 85 kV erzeugten Strahlung. Ist die Primärstrahlung dagegen mit einer Spannung von 300 kV erzeugt, so entspricht die Streustrahlung nur einer Spannung von etwa 180–190 kV. Dieser Effekt ist z. B. von der Betrachtung der Strahlenschutzprobleme bekannt; man kann die Streustrahlung mit wesentlich dünneren Schutzschichten ausreichend abschirmen, als die Nutzstrahlung, da sie sehr viel weniger durchdringend ist.)

Hiernach sollte man also erwarten, daß durch den Streustrahlensatz aus den Isolierstoffen der Röhrenhaube eine im Mittel weichere Strahlung im Bestrahlungsfeld bzw. in der Ionisationsmeßkammer auftreten wird als es ohne diese Streustrahlung der Fall sein würde. Bei Betrachtung der Abb. 2 fällt jedoch auf, daß die prozentualen Unterschiede zwischen den Kurven um so größer sind, je stärker das Filter ist. Die stärker gefilterte Strahlung enthält also einen größeren Anteil an Streustrahlung



als die wenig gefilterte. Auf die Strahlenqualität bezogen heißt dies, daß die stärker ausgeblendete Strahlung die also weniger Streustrahlung enthält, weicher ist als die weniger stark ausgeblendete. Ausgedrückt durch die HWS, die sich für die verschiedenen benutzten Ausblendungen ergeben, erhält man, wenn man von 0,5 mm Cu-Gesamtfilter ausgeht,

|          |            |      |
|----------|------------|------|
| (Kurve 0 | 0,98 mm Cu | HWS) |
| „ 1      | 1,00 „ „ „ |      |
| „ 2      | 1,03 „ „ „ |      |
| „ 3      | 1,05 „ „ „ |      |
| „ 4      | 1,08 „ „ „ |      |

(Der Wert für Kurve 0 ist eingeklammert, weil es sich nicht um einen Meßwert handelt.) Die in Abb. 2 gestrichelt gezeichnete Kurve ist die Schwächungs-

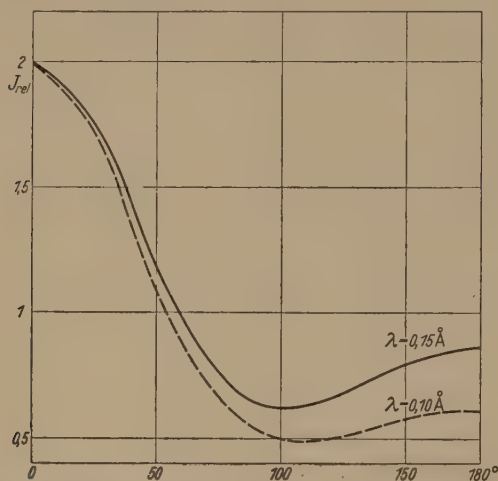


Abb. 3. Winkelverteilung der Intensität der Compton-Streustrahlung.

kurve der gesamten Streustrahlung aus der Haube (= Differenz zwischen den Kurven 4 und 0. Die Maßzahlen der Ordinate müssen bei dieser Kurve durch 10 dividiert werden). Die HWS der Streustrahlung ist hinter 0,5 mm Kupferfilter  $> 1,7$  mm Kupfer. Ohne Zusatzfilter ist die HWS der Gesamtstrahlung etwa 0,35 mm Cu, die der Streustrahlung dagegen etwa 0,4 mm Cu. Die Streustrahlung ist also wesentlich härter als die Primärstrahlung. Ihre Schwächungskurve entspricht etwa einer erzeugenden Röhrengleichspannung von 250 kV. Obgleich also bei jedem einzelnen Streuvorgang die Wellenlänge vergrößert wird, ist die gestreute Strahlung hier im Mittel härter als die Primärstrahlung. Der scheinbare Widerspruch zwischen dieser Tatsache und den oben angeführten Ergebnissen bei den Streustrahlenmessungen ist jedoch recht einfach aufzuklären.

Die Vergrößerung der Wellenlänge bei der Quantenstreuung ist nach der Theorie des COMPTON-Effektes von dem Winkel  $\vartheta$  zwischen der Bewegungsrichtung des primären und der des gestreuten Quantes abhängig. Sei  $\lambda_0$  die Wellenlänge des einfallenden und  $\lambda$  die des gestreuten Röntgenquants, so gilt:

$$\lambda = \lambda_0 + 2 \lambda \cdot \sin^2 \frac{\vartheta}{2}.$$

Dabei ist  $\lambda = 0,0242 \text{ \AA}$  (COMPTON-Wellenlänge). Die maximale Vergrößerung der Wellenlänge tritt also auf, wenn das Lichtquant in die Einfallrichtung zurückgestreut wird, und zwar beträgt sie dann fast 0,05 Å. Bei Streuung im rechten Winkel wird die

Vergrößerung der Wellenlänge gerade gleich  $\lambda$ . In der Streuung aus der Haube werden nun aber stark abgelenkten Quanten aus dem Strahlenkegel herausgestreut. Die maximal mögliche Ablenkung eines Quantes, nach der es noch in das Bestrahlungsfeld kommen kann, beträgt etwa  $20^\circ$ – $25^\circ$ . In diesem Fall ist die Wellenlängenänderung etwa  $0,002 \text{ \AA}$  oder 2 X-Einheiten. Hat das primäre Quant aber die Energie entsprechend einer Wellenlänge von 0,15 Å, so ist die zu dieser Strahlung gehörende HWS von 1,10 mm Kupfer. Zu der Wellenlänge des gestreuten Quantes gehört dann eine HWS von 1,08 mm Kupfer. Bei einem Primärquant von 0,10 Å ergibt sich entsprechend eine Herabsetzung der HWS von 2,5 auf 2,4 mm Kupfer. Dies sind extreme Werte. Im Mittel ist also eine wesentlich geringfügigere Verkleinerung der HWS zu erwarten. Eine stärkere Abweichung der Strahlung durch Mehrfachstreuung braucht in diesem Fall nicht in Betracht gezogen zu werden, da die von der Primärstrahlung durchsetzte Haubenmaterie diese bei den betrachteten Strahlungshärten nur um etwa 20% schwächt. Mehrfach gestreute Strahlung kann also in dem hier untersuchten Fall nicht in quantitativ merklichem Umfang zur Nutzstrahlung beitragen.

Diese Betrachtungen haben gezeigt, daß die aus dem Feld auftretende Streustrahlung aus der Haube sicher nicht merklich weicher ist als die Primärstrahlung. Die Erklärung des experimentellen Befundes erhält man durch Berücksichtigung der Abhängigkeit des Streuwinkels von der Härte der Strahlung. Die Streustrahlung ist nicht isotrop, vielmehr ist die auf den Raumwinkel bezogene relative Intensität der um den Winkel  $\vartheta$  abgelenkten Strahlung der primären Wellenlänge nach der Theorie von GORDON und DIRAC gegeben durch:

$$J_{\text{Streu-rel.}} = K \cdot \frac{1 + \cos^2 \vartheta}{\left(1 + 2 \frac{\lambda}{\lambda_0} \sin^2 \frac{\vartheta}{2}\right)^3}.$$

In Abb. 3 ist diese Winkelverteilung für die Wellenlängen  $\lambda_0 = 0,10 \text{ \AA}$  und  $\lambda_0 = 0,15 \text{ \AA}$  wiedergegeben. Bei der härteren Strahlung wird also ein merklich größerer Bruchteil der insgesamt gestreuten Strahlung in den Bereich kleiner Ablenkungswinkel gestreut. Der integrale Streuungs-Koeffizient ändert sich in dem vorliegenden Härtebereich nur beträchtlich mit der Wellenlänge. Es ist also leicht zu verstehen, daß der Anteil der Streustrahlung der Nutzstrahlung im Mittel härter ist als die Primärstrahlung, da die energiereicheren Quanten bei Streuung mit merklich größerer Wahrscheinlichkeit innerhalb des Nutzstrahlenkegels verbleiben als energieärmeren.

#### V. Folgerungen für die Praxis.

Es wurde gezeigt, daß die Röntgenstrahlung zugleich ihrer Quantität wie auch ihrer Qualität nicht eindeutig durch die elektrischen Betriebsdaten bestimmt ist. Bei der Standardbestrahlungsbedingung (200 kV; 20 mA; 0,5 mm Cu-Filter) ist bei der größtmöglichen Haubenöffnung die Dosisleistung um 10% höher und die HWS um fast 0,1 mm Cu größer als bei sehr eng ausgeblendetem Strahlenkegel. Nach diesen Ergebnissen muß man nicht nur fordern, daß die Dosisleistung in dem Aufbau gemessen wird, der der Bestrahlung angewandt werden soll [2], sondern



an muß auch das gleiche für die Messung der HWS erlangen. Die in dem DIN-Blatt 6809 gegebene Meßvorschrift ist also zu speziell und für höhere Ansprüche an die Genauigkeit der HWS-Messung nicht ausreichend. Bei dem hier besprochenen Fall der Ölhauben wird man nach der DIN-Vorschrift niedrigere Halbwertschichten messen als im Anwendungsfall.

#### Zusammenfassung.

Die Halbwertschichtmessung bei Benutzung von Röntgenröhren in ölisierten Hauben wird be-

sprochen. Aus den Meßwerten ergibt sich, daß die in die Ionisationskammer gelangende Streustrahlung aus dem durchstrahlten Isolieröl und dem Haubenfenster im Mittel härter ist als die Primärstrahlung. Dies Ergebnis wird erklärt.

**Literatur.** [1] ZIELER, E.: Strahlentherapie 85, 547 (1951). — [2] HOLTHUSEN, H. und R. BRAUN: Grundlagen und Praxis der Röntgenstrahlung-Dosierung (1933) S. 106.

Dr. E. ZIELER,  
Hamburg-Fuhlsbüttel, Am Lustberg 10.

## Über neuere Messungen der Zähigkeit des Wassers.

Von F. HÖPLER.

Mit 1 Textabbildung.

(Eingegangen am 28. Mai 1952.)

Vor über 100 Jahren ermittelte der Pionier der Viskosimetrie, M. POISEUILLE [1], erstmals den Zähigkeitskoeffizienten des Wassers. Aus seinen Messungen errechnet sich, unter Berücksichtigung der HAGENBACH'schen Korrektur, ein Wert von 1,008 cP bei 20° C. Seitdem sind viele Absolutmessungen der Wasserzähigkeit durchgeführt worden, z. B. von PRUNG, SLOTTE, THORPE u. RODGER, HOSKING, BINGHAM u. WHITE. BINGHAM u. JACKSON [2] haben Mittelwerte aus diesen Beobachtungen gebildet, indem sie diese Meßreihen in der Weise korrigierten, daß offenbare Unstimmigkeiten hinsichtlich des wahren mittleren Druckes beseitigt wurden und für alle Beobachtungen gleichmäßig der Wert für die HAGENBACH'sche Korrektur von  $m = 1,12$  eingesetzt wurde. Es ergab sich ein Mittelwert der Zähigkeit des Wassers bei 20° von 1,0046 cP.

S. ERK [3] vertritt den Standpunkt, daß die Zähigkeit des Wassers bei 20° immerhin noch mit einer Unsicherheit von  $\pm 0,5\%$  behaftet ist. Vom gleichen Autor wurde in der PTR ein Fundamentalkosimeter entwickelt und später, zusammen mit L. SCHMIDT, nochmals verbessert. Mit diesem Instrument wurden Zähigkeitsmessungen an stabilen Mineralölen durchgeführt, die als Zähigkeitsnormale der PTR (und später des DAMG in Weida) an Interessenten abgegeben werden. Die absolute Genauigkeit der Zähigkeitsangabe ist  $\pm 0,25\%$ . Leider sind Fundamentalmessungen an Wasser, mangels geeigneter Kapillaren, bis heute mit diesem Instrument noch nicht durchgeführt worden.

H. KLOTZSCHE [4] hat im Prüfungslaboratorium des Herstellerbetriebes des HÖPLER-Viskosimeters über einen Zeitraum von mehreren Jahren in hundert von mit extremer Genauigkeit angestellten Versuchsreihen die genannten Zähigkeitsnormale unter sich und mit redestilliertem Wasser verglichen. Die Meßreihen ergaben stets einen um 1,008 cP liegenden Zähigkeitswert des Wassers bei 20°. H. KLOTZSCHE findet sich hierbei auch in Übereinstimmung mit den Angaben der Intern. Critical Tables, wonach der internationale Wert 1,0087 cP bei 20° beträgt [5].

Neuerdings stehen uns auch andere Wege offen, möglichst genau die Zähigkeit des Wassers zu bestimmen. Verf. hat derartige Messungen durchgeführt und ging dabei von Luft als Vergleichsstoff aus, da nach den neueren Messungen von J. A. BEAR-

DEN [6] die Luftzähigkeit auf 0,003% genau bekannt ist. BEARDEN ermittelte den Wert von Luft  $\eta_{20^\circ} = 0,0181920 \pm 0,0000006$  cP.

Da das Verhältnis der Zähigkeit von Luft und Wasser etwa 1 : 55 beträgt, ist es möglich, in einem

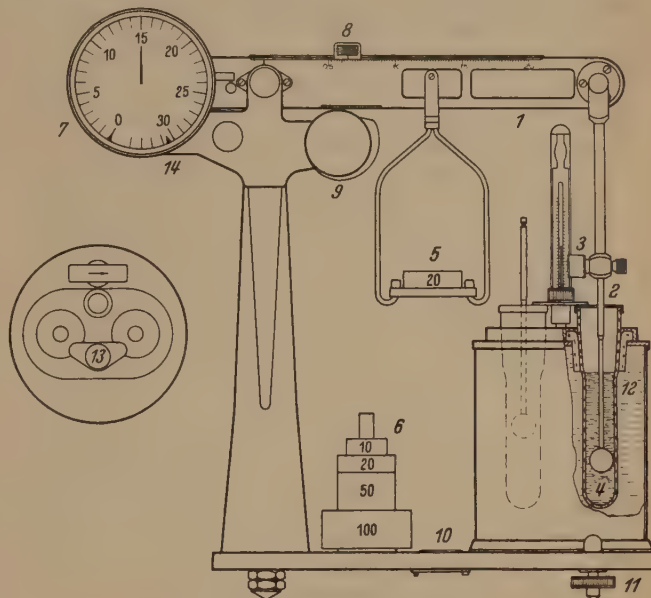


Abb. 1.-Rheo-Viskosimeter nach HÖPLER.

Viskosimeter, welches diese Meßbreite überdeckt, Vergleichsmessungen unter gleichen Bedingungen durchzuführen. Allerdings scheiden Kapillarviskosimeter aus, da durch die hierbei erforderliche HAGENBACH'sche Korrektur Unsicherheiten in die Messung hineingetragen werden. Als Meßinstrument diente das vom Verf. entwickelte Rheo-Viskosimeter, welches, da es nicht nur zur Messung reinviskoser Flüssigkeiten, sondern auch zur Ausmessung kolloider Systeme dient, hier erstmals ausführlich beschrieben werden soll (Abb. 1).

An dem einen Ende eines im indifferenten Gleichgewicht befindlichen doppelarmigen Hebels 1 ist eine mit einem Stab verbundene Kugel 2 pendelnd aufgehängt. Durch ein kleines definiertes Gewicht 3 wird die Kugel so weit von der Lotrechten abgelenkt, daß sie soeben die Wandung des mit dem zu untersuchenden Material gefüllten Hohlzylinders 4 leicht



berührt. Die auf die Waagschale 5 aufgelegten Gewichte 6 drücken dann die Kugel durch den Versuchsstoff, der den sichelförmigen Ringspalt zwischen Kugel und Hohlzylinder laminar durchströmt.

Das andere Ende des Hebelarmes ist mit einem fast trägheitslos arbeitenden Wegmesser 7 gekuppelt. An einer Skala wird der 30 mm lange Weg  $s$  der Kugel verfolgt und die Meßzeit ( $t$ ) mit einer Stoppuhr bestimmt. Der Quotient  $s/t$  entspricht der mittleren Fließgeschwindigkeit bei den jeweils verwendeten, auf den Gewichten verzeichneten Belastungen ( $10 \cdots 200 \text{ g/cm}^2$ ), die der mittleren Schubspannung proportional sind. Hierdurch wird die Aufnahme von Fließkurven in einem Bereiche von  $1 : 20$  ermöglicht. Durch fünf auswechselbare Meßbehälter von unterschiedlicher lichter Weite (die Kugel von  $2 \text{ cm}^2$  Querschnitt bleibt unverändert) wird ein Viskositätsbereich von  $0,5 \cdots 4\,000\,000 \text{ (cP)}$  bei Meßzeiten von  $6 \cdots 200 \text{ sec}$  überdeckt.

Der Auftrieb, den die Kugel im Versuchsstoff erfährt, wird durch Verstellen des Laufgewichtes 8 auf einer Dichteskala kompensiert. Die Rückbewegung der Kugel in die Anfangsstellung bewirkt ein Exzenter 9 und gestattet eine beliebige Wiederholung der Messung. Die Meßstellung des Instrumentes wird durch Einspielen der Dosenlibelle 10 mittels der Justierschrauben 11 gesichert.

Die Meßbehälter sind mit Normalschliff ausgestattet und werden einfach in die Hülsen des Temperierbades 12 eingesetzt. Eine Haltevorrichtung 13 sorgt für feste Lage.

Die Temperierung des Instrumentes erfolgt durch Anschluß mittels der neuen Schlauchkupplungs-Zange nach HÖPPLER an einen Umlauf-Thermostat z. B. Ultra- oder Quanten-Thermostat nach HÖPPLER.

Für Viskositätsmessungen an reinviskosen Flüssigkeiten wird stets die ganze Meßstrecke benutzt. Jedem der fünf Meßbehälter ist eine Zahl zugeordnet, die zwischen 28,5 und 31,5 liegt, und die mittels einer Wandermarke 14 an der Skala 7 vor der Messung eingestellt wird. Es ist dann nur erforderlich, die von der Stoppuhr angezeigten Sekunden mit den auf dem Meßbehälter aufgravierten Dezimalfaktoren  $0,01 - 0,1 - 1 - 10 - 100$  ferner mit 10 oder 100 zu multiplizieren, um bei Verwendung des  $10$  oder  $100 \text{ g/cm}^2$  Gewichtes die Viskosität des Versuchsstoffes direkt in Centipoise, ohne jede Rechnung, zu erhalten.

Die Aufnahme von Fließkurven strukturviskoser Stoffe erfolgt in der Weise, daß Teilstrecken der ganzen Meßstrecke ( $0 \cdots 5, 6 \cdots 11, 12 \cdots 17, 18 \cdots 23$  u.  $25 \cdots 30 \text{ mm}$ ) bei unterschiedlichen Belastungen ( $10, 20, 40, 80, 160 \text{ g/cm}^2$ ) ausgemessen werden. Hierbei wird der zu messende Stoff nur einmal und mechanisch unbehandelt zum Fließen gebracht, sowie während eines möglichst kurzen Fließens gemessen.

Der Beobachter ist bezüglich der Vorbereitungen zur Messung nicht an das Instrument gebunden, da die Meßbehälter Normalschliff haben und lediglich in das Instrument eingesetzt werden. Demgemäß können in den Meßbehältern die Untersuchungsstoffe außerhalb des Instrumentes beliebig mechanisch, thermisch, optisch, ultraakustisch, elektrisch usw. behandelt oder auch gealtert werden, um nach solchen Einwirkungen erneut auf ihr rheologisches Verhalten geprüft zu werden.

Der engste Meßbehälter  $0,01$  erwies sich für Gasmessungen als ungeeignet, denn eine Berechnung zeigt, daß die Konstante des Meßbehälters etwa in der Größenordnung  $0,00003$  liegen muß, wenn genügende lange Meßzeiten bei Luft erzielt werden sollen. An einem größeren Vorrat Fallrohre zum HÖPPLER-Viskosimeter wurden diesen Bedingungen entsprechenden Rohre ausgewählt, als Meßbehälter zugerichtet und nochmals auf gleiches Lumen geprüft. Die Prüfung erfolgte in der Weise, daß das Rohr horizontal auf den Tisch eines Meßmikroskopes aufgespannt wurde. Zwei in die Enden des Rohres eingepaßte und achsen durchbohrte Metallzylinder mit entsprechenden Maßungen gestatteten das Rohr so auszurichten, daß dessen Achse parallel zum Schlitten des Meßmikroskopes lag und bei Bewegung des Schlittens über eine Strecke von  $40 \text{ mm}$  der Zenit des Rohrhohlraumes stets im Gesichtsfeld des Mikroskopes verblieb. Das verwendete Zeiß-Objektiv 20 gestattete einen noch genügenden Objektabstand hinsichtlich der  $1,6 \text{ mm}$  betragenden Wandstärke des Rohres. Innerhalb des Rohres befand sich eine Glaskugel, die mit optischer Genauigkeit hergestellt war und für die Carl Zeiß Jena einen Durchmesser von  $15,910 \pm 0,0002 \text{ mm}$  angegeben hatte. Es wurde bei 230 facher Vergrößerung durch Heben und Senken des Tubus auf die winzigen kleinen „Kratzer“, bzw. Polierstriche eingestellt, um zwar einmal im Zenit des Rohrhohlraumes, ferner an den darunter erscheinenden obersten Punkt der Kugeloberfläche, die ebenfalls, wenn auch in geringerem Maße, winzige Oberflächenfehler aufwies. Besonders gut waren diese „Einstellmarken“ bei seitlicher Beleuchtung mit monochromatischem Licht ( $546 \text{ m}\mu$ ) zu erkennen. An der in  $2 \mu$  geteilten Trommel der vertikalen Tubusbewegung konnte dann die maximale Spaltbreite zwischen Kugel und Rohr abgelesen werden. An einem besonders maßgerechten Rohr wurde die Messung in Teilabschnitten (durch Verschieben der Kugel) durchgeführt und nach einer Drehung des Rohres um  $90^\circ$  nochmals wiederholt. Die ermittelte maximale Spaltbreite betrug  $0,009 \text{ mm}$ , die Messungen über eine  $35 \text{ mm}$  lange Strecke lagen innerhalb einer Fehlergrenze von  $1 \mu$ . Mit der Ermittelung dieses gleichförmigen Lumens wurde gleichzeitig auch eine Aussage über den tatsächlichen Innendurchmesser des Rohres erhalten, da der Durchmesser der Kugel mit einem Zeiß-Optimeter auf  $0,015910 \text{ mm}$  genau bestimmt worden war. Die lichte Weite des Rohres errechnet sich daher zu  $15,919 \text{ mm}$ . Die Glaskugel wurde mit Diamant- und Widiabohrer ausgebohrt und mittels Zahnzement an einem  $\frac{1}{2}$  Zoll Stahlstab befestigt. Während der Meßreihen blieben beide Meßaggregate, Meßbehälter und Kugelstab, am Meßinstrument an ihrem Platz. Ihre Lage wurde während der Messungen an Luft und Wasser nicht geändert.

Es stellte sich noch eine weitere Schwierigkeit bei den angestellten Luftmessungen dar, nämlich die völlige Unabhängigkeit der Reinigungsmethode vom Meßbehälter. In allen Fällen wurde die mechanische Reinigung mit Bürste und einer Schlammkreide-Methanol-Wasser-Mischung, nachfolgendes Bürsten mit destilliertem Wasser, Ausspülen mit Alkohol und schließlich Äther durchgeführt. Hierauf erfolgte Durchblasen von gefilterter, etwa  $45^\circ$  warmer Luft. Es ergaben sich bei einer Belastung von  $P = 15 \text{ g/cm}^2$



Meßzeiten von etwa 36,7 sec. Auch die gleiche Reinigungsmethode, die nach dem Bürsten mit dest. Wasser nur ein mehrmaliges Ausspülen des Meßbehälters mit redest. Wasser vorsah, ergab mit der gleichen Durchblasung von Luft Werte, die in der gleichen Größenordnung lagen. Erst das Nachspülen der so behandelten trockenen Meßbehälter mit einem frisch gewaschenem und in dest. Wasser gespültem reinem Baumwolltuch, Entfernung der fast um sichtbaren Fasern durch einen gefilterten starken Luftstrom und Belassung des Meßbehälters über den Zeitraum von etwa 2 Stunden vor der Messung, ergab Meßzeiten, die bei 36,62 sec lagen und auf etwa 0,12% konstant waren. Aus dem gesamten Komplex der Meßtechnik dürfte hervorgehen, daß die jeweils ermittelte niedrigste Meßzeit die richtigste sein dürfte.

Die Luftmessungen wurden sonntags bei Betriebsbedingungen in einem gut gelüfteten Raum durchgeführt. (0. 6. 51). Barometerstand = 745,8 · 747,2 mm. Die Temperaturkonstanz betrug während der gesamten Meßreihe  $\pm 0,02^\circ$ , das verwendete Thermometer war in  $0,01^\circ$  geteilt und kurz vorher vom DAMG bei  $20^\circ$  auf  $0,005^\circ$  genau geprüft worden. Es nachzuweisen, daß die Meßergebnisse korrekturfrei sind, wurde bei unterschiedlichen Drucken von  $\dots 25 \text{ g/cm}^2$  gemessen.

Luft bei  $20,00^\circ$

| $P$<br>g/cm <sup>2</sup> | $t$<br>sec | $P \cdot t$ |
|--------------------------|------------|-------------|
| 15                       | 30,62      | 549,3       |
| 20                       | 27,53      | 550,6       |
| 25                       | 22,00      | 550,0       |

}  $550,0 \pm 0,12\%$

Die in der Tabelle angegebenen Meßzeiten sind Mittelwerte aus insgesamt 45 Einzelmessungen.

Nach beendeter Luftmessung wurde das Instrument in seinem Zustand belassen und in den Meßbehälter die Mittelfraktion von redestilliertem Wasser bei einer Kühltemperatur von etwa  $30^\circ$  eindestilliert. Nach etwa einstündiger Temperierzeit wurde mit den Messungen begonnen.

Wasser bei  $20^\circ$ .

| $P$<br>g/cm <sup>2</sup> | $t$<br>sec | $P \cdot t$ |
|--------------------------|------------|-------------|
| 15                       | 2032,2     | 30483       |
| 20                       | 1523,5     | 30470       |
| 25                       | 1219,2     | 30476       |

}  $30476 \pm 0,02\%$

Die angegebenen Meßzeiten sind Mittelwerte aus insgesamt 12 Einzelmessungen.

Der Quotient der  $P \cdot t$ -Werte  $30476 : 550,0 = 45,41$  sagt, daß bei  $20^\circ$  die Zähigkeit des Wassers 45,41mal größer ist als die von Luft.

Die bereits oben mitgeteilte Tatsache, daß die von J. A. BEARDEN mitgeteilten Zähigkeitswerte für Luft eine Genauigkeit von 0,003% besitzen, berechnete dazu, Luft als Zähigkeits-Normal in die Viskosimetrie einzubeziehen. Es ist dann lediglich erforderlich, den vorstehenden Quotienten mit der Luftzähigkeit zu multiplizieren, um die Wasserzähigkeit zu erhalten. Diese beträgt dann:

$$\eta_{20^\circ} = 0,0181920 \cdot 55,41 = 1,0080 \text{ cP.}$$

Die Meßgenauigkeit dieses Wertes liegt dann im Bereiche der vorstehend bekanntgegebenen Meßgenauigkeit der Luft im Rheo-Viskosimeter und dürfte mit  $\pm 0,1\%$  zu veranschlagen sein. Es boten sich auch noch andere Möglichkeiten, diesen Wert nachzuprüfen. So haben z. B. R. WOBSE u. FR. MÜLLER [7] in einer ausgezeichneten Arbeit und in Versuchsreihen bis zu etwa 260 Einzelmessungen versucht, die Luftzähigkeit von dem damals international anerkannten Wasserwert (1,005 cP bei  $20^\circ$ ) abzuleiten. R. WOBSE gelangte zu einem Wert von 0,01815 cP für Luft bei  $20^\circ$ . Diesem Meßergebnis ist eine besondere Bedeutung insofern zuzumessen, da R. WOBSE die Messungen in einem zwar unterschiedlichen, aber sehr niedrigem Druckbereich durchführte ( $P = \text{etwa } 1,5 \text{ g/cm}^2$ ), während der Verf. Drucke von  $15 \dots 25 \text{ g/cm}^2$  verwendete, in der Annahme, daß die höher belastete Kugel von im Meßweg evtl. vorhandenen Fremdstoffen, wie Fasern und Stäubchen, weniger beeinflußt wird. Dies war aber nicht der Fall, denn der Quotient aus den Messungen R. WOBSEs für Luft und Wasser beträgt:  $1,005 : 0,01815 = 55,37$  und stimmt überraschend genau mit dem vom Verf. ermittelten Wert 55,41 überein.

Multipliziert man diesen Quotienten mit dem Luftzähigkeitswert von J. A. BEARDEN, so ergibt sich die Zähigkeit des Wassers zu:

$$\eta_{20^\circ} = 0,0181920 \cdot 55,37 = 1,0072 \text{ cP.}$$

Zusammenstellung der Werte für Wasser bei  $20^\circ$ .

|                   |           |  |
|-------------------|-----------|--|
| N. E. DORSEY. . . | 1,0087 cP | Mittel = $1,0080 \text{ cP} \pm 0,1\%$ |
| H. KLOTZSCHE . .  | 1,008 cP  |  |
| F. HÖPPLER . . .  | 1,0080 cP |  |
| R. WOBSE. . . .   | 1,0072 cP |  |

Nach den vorstehenden Berechnungs- und Meßergebnissen dürfte dem vor 35 Jahren von BINGHAM u. JACKSON gebildeten Wasserwert bei  $20^\circ = 1,005 \pm 0,5\%$  nicht mehr die Bedeutung zukommen, die ihm heute noch beigemessen wird. Der vom Verf. aufgefundene Wert, der übrigens im Fehlerbereich des alten Wertes liegt, dürfte als der wahrscheinlichere angesprochen werden, zumal ihm eine Genauigkeit von  $\pm 0,1\%$  zukommt.

### Zusammenfassung.

Die bisher ermittelten Werte der Zähigkeit des Wassers bei  $20^\circ$  werden diskutiert. Mit einem neuartigen Kugeldruck-Viskosimeter, dem Rheo-Viskosimeter, werden Vergleichsmessungen von Luft und Wasser vorgenommen. Durch die BEARDENSchen Messungen der Luftzähigkeit, denen eine Genauigkeit von  $\pm 0,003\%$  zukommt, ist es möglich, Luft als Zähigkeits-Normal in die Viskosimetrie einzuführen.

Das Zähigkeitsverhältnis von Luft und Wasser wurde bei  $20^\circ$  zu  $1 : 55,41$  bestimmt, und zwar mit einer Genauigkeit von etwa  $0,1\%$ . In früheren, ähnlich gearteten Arbeiten, wurde  $1 : 55,37$  festgestellt. Vergleiche der Zähigkeits-Normale der PTR und der DAMG mit Wasser ergaben Meßresultate, die mit einer Genauigkeit von  $\pm 0,1\%$  in der gleichen Größenordnung lagen.

Unter Berücksichtigung des von N. E. DORSEY (Intern. Critical Tables) gefundenen Wertes, ergibt



sich die Zähigkeit des Wassers bei 20° zu 1,0080 cP  $\pm 0,1\%$ . Der von BINGHAM u. JACKSON vor 35 Jahren ermittelte Wert von  $1,005 \pm 0,5\%$  wird besser nicht mehr verwendet.

**Literatur.** [1] POISEUILLE, M.: Ann. Chim. Phys. 7, 50 (1843). — [2] BINGHAM, E. C. und R. F. JACKSON: Bur. of.

Stand. Scient. Paper Nr. 298 (1917). — [3] ERK, Zähigkeitsmessungen an Flüssigkeiten, Berlin 1927. — [4] KLOTZSCHE, H.: Private Mitteilung. — [5] DORR, N. E.: Intern. Critical Tables Bd. 5, S. 110. — [6] BEAR, J. A.: Phys. Rev. 56, 1023 (1939). — [7] WOBSE, R. F. MÜLLER: Kolloid-Beih. 52, 165 (1941).

F. HÖPFLER, Medingen b. Dresden

## Berichte.

### Farbfernsehen.

Von A. KAROLUS.

Mit 40 Textabbildungen.

(Eingegangen am 3. Mai 1952.)

#### A. Einleitung.

Der folgende Bericht will einen Überblick geben über die neuere Entwicklung und den heutigen Stand des Farbfernsehens. Wenn auch die physikalischen und physiologischen Grundlagen hierfür seit Jahrzehnten bekannt sind, so wurden doch erst in den letzten Jahren technisch brauchbare Verfahren für die Aufnahme und Wiedergabe einer Fernseh-Sendung in Farben geschaffen.

Die technische Basis für das Farbfernsehen bilden die außerordentlichen Fortschritte im Bau von Schwarz-Weiß-Fernseh-Empfängern, vor allem die Steigerung der Bildgröße und der Bildhelligkeit. Die Bildgröße liegt heute bei durchschnittlich 40 cm Bilddiagonale, die Schirmhelligkeit bei etwa 1000 Lux. Ermöglicht wurden derartige Leuchtdichten durch systematische Verbesserungen der Elektronenoptik und der Leuchtphosphore, durch Erhöhung der Anodenspannung der Bildröhre auf 12–20 kV und durch „Aluminisierung“ des Leuchtschirmes [1]. Erst diese Vergrößerung der Schirmhelligkeit um etwa 1 Größenordnung im Vergleich zum Stand von 1940 machte die Wiedergabe von Farben möglich.

Von der sehr umfangreichen Literatur über Fernsehen seien hier nur die Bücher von DOME [2], FINK [3] und KERKHOF-WERNER [4] genannt.<sup>1</sup> Über die Fortschritte im Bau von Fernseh-Empfangsröhren in den letzten 10 Jahren berichtet zusammenfassend H. MOSS [5], über Physik und Technik der Phosphore G. F. GARLICK [6].

Bei der wirtschaftlichen Bedeutung der Fernseh-Industrie in USA und der weiten Verbreitung, die der Fernseh-Rundfunk dort innerhalb kurzer Zeit erreicht hat, ist es verständlich, daß der größte Teil der Entwicklungsarbeiten, über die nachstehend berichtet wird, in amerikanischen Laboratorien entstanden ist: Radio Corporation of America (RCA), General Electric Company (GEC), Columbia Broadcasting Corporation (CBC), HAZELTINE, DU MONT, PHILCO u. a. mehr.

Im Oktober 1950 hat das Federal Communication Committee (FCC) ein von der Columbia Broadcasting Corp. entwickeltes Farbfernseh-Verfahren zur Einführung in den Fernseh-Rundfunk zugelassen. Inzwischen wurden die Farbseendungen vorübergehend wieder eingestellt, es besteht aber heute kein Zweifel mehr darüber, daß innerhalb der nächsten Jahre das Schwarz-Weiß-Fernsehen durch ein oder einige Farbverfahren ergänzt oder ersetzt werden wird.

<sup>1</sup> Inzwischen erschienen: „Fernsehtechnik“ von F. KIRSCHSTEIN und G. KRAWINKEL.

Durch additive Mischung dreier passend gewählter Grundfarben, gewöhnlich Rot (R), Grün (G) und Blau (B) lassen sich die meisten Farbtöne wiedergeben. Aus der Dreifarbenlehre ist bekannt, [7]—[10], wie diese Primärfarben festzulegen sind, um den reproduzierbaren Bereich an Farben möglichst groß zu gestalten. Von neueren Arbeiten über die Beziehungen zwischen Kolorimetrie und Farbfernsehen seien die von CHERRY [12] und von WINTRINGHAM [13] erwähnt.

Beim Schwarz-Weiß-Fernsehen unterscheiden sich die einzelnen Bildelemente eines Bildes nur in der Helligkeit (Helligkeit), es genügt daher eine Zahl für die Charakterisierung eines Bildelementes. Zur Kennzeichnung der Farbe sind wenigstens 3 Zahlenwerte für jedes Bildelement notwendig. Dieses Zahlentripel kann dabei entweder die Intensitäten der 3 Grundfarben des betreffenden Bildelementes festlegen, oder Helligkeit (brightness), Farbton (hue) und Sättigung (saturation) oder die dominierende Wellenlänge, Energie und Weißgehalt angeben.

Der Einfachheit halber soll zunächst nur von der ersten Art der Farbdefinition und Farberzeugung, der additiven Mischung der Farbe aus 3 Primärfarben, gesprochen werden. Alle bisher verwirklichten Fernseh-Verfahren arbeiten nach diesem Prinzip. Im Gegensatz hierzu sind bekanntlich in der Farbphotographie die meisten gebräuchlichen Methoden destruktiver Art, ebenso beim Dreifarbendruck. Strahltraktive Farbfernseh-Verfahren, die eine elektrische Steuerung der spektralen Absorption voraussetzen, sind bisher nicht bekannt geworden.

Die klassische Dreifarben-Photographie geht von 3 Farbauszügen aus, also 3 Schwarz-Weiß-Bildern. Deren Schwärzung an jeder Stelle ein Maß für die betreffende Farbkomponente ist. Analog zerlegt man beim Farbfernsehen das farbige Bild in 3 Teilbilder (R, G, B), wandelt alle Helligkeitswerte der 3 Teilbilder in elektrische Signale um und steuert durch diese Signale 3 komplementäre Farbkeile auf der Empfangsseite.

Zur additiven Farbmischung stehen 3 Möglichkeiten zur Verfügung: 1. gleichzeitige Belichtung einer Stelle der Netzhaut mit 3 Grundfarben, 2. rascher Wechsel der 3 Farbkeile, die die gleiche Netzhautstelle treffen und 3. Aufbau des Farbbildes aus so kleinen Farbflächen, daß das Auge die einzelnen Farbpunkte oder Farblinien nicht mehr trennen kann. Alle 3 Mischungsprozesse finden praktische Anwendung.



## B. Kennzeichnung verschiedener Farbsysteme.

Vom Sehvorgang ausgehend, sind grundsätzlich 2 Möglichkeiten der Farbwiedergabe zu unterscheiden: gleichzeitiges Einwirken aller 3 Farben (simultaneous method) oder sukzessive Erzeugung der 3 Farbreize (Farbwechsel, sequential method). Die Ausdrücke „simultaneous“ und „sequential“ werden in der Literatur auch häufig zur Kennzeichnung der elektrischen Signalübertragung angewendet. In diesem Zusammenhang spricht man von Simultanverfahren, wenn die Signale, welche von den 3 Farbsignalzügen herrühren, *gleichzeitig auf 3 getrennten Kanälen* übertragen werden (Abb. 1), und von Farbwechsel- oder Farbfolge-Verfahren bei einer absatzweisen Übertragung der 3 Auszüge *zeitlich nacheinander über einen gemeinsamen Kanal* (Abb. 2). Die Hilfsmittel für die Bildaufnahme und für die Wiedergabe können für beide Gruppen identisch sein. Das unterscheidende Merkmal liegt in diesem Fall nur in der Art der elektrischen Übertragung der drei Teilbilder.

### a) Simultan-Verfahren.

Das in Abb. 1 dargestellte Verfahren ist simultan, sowohl in bezug auf den Mischprozeß im Auge, wie auch in bezug auf die gleichzeitige Übertragung der Teilbilder in 3 Kanälen. Der farbige Gegenstand wird über selektiv reflektierende Spiegel durch drei optische Objektive auf den Photokathoden dreier Fernseh-Aufnahmeröhren abgebildet. Die Ausgangssignale dieser Kameras geben in jedem Augenblick die 3 Farbkomponenten *eines* bestimmten Bildelementes wieder. Auf 3 getrennten Leitungen oder als Modulation dreier verschiedener Trägerschwingungen übertragen, steuern diese Signale die Helligkeit von 3 Fernseh-Wiedergaberöhren mit verschiedenen Leuchtschirmen, so daß deren Phosphor jeweils in einer der 3 Grundfarben durch die auftreffenden Elektronen angeregt wird. Die in jedem Augenblick erzeugten 3 Farbreize können z. B. so addiert werden, daß die getroffenen Stellen der Leuchtschirme durch 3 Projektionsobjektive auf einem Flächenelement einer Mattscheibe oder einer Projektionswand zur Deckung gebracht werden. Besteht Übereinstimmung im zeitlichen Verlauf der Ablenkung aller Röhren, so überdecken sich die 3 Teilbilder an allen Stellen des Bildfeldes, und für alle Bildelemente entsteht die richtige additive Mischfarbe. Die Schwierigkeiten, die in der exakten Deckung der Teilbilder liegen, werden später diskutiert werden, ebenso andere Möglichkeiten zur Addition der 3 Teilbilder. Im letzten Stand der Farb-Empfangstechnik tritt an Stelle der 3 Empfängerrohren eine Dreifarbröhre (tricolor tube). Ihr Aufbau wird in Abschn. F behandelt werden.

### b) Farbwechsel-Verfahren.

Die zweite Gruppe von Farbfernseh-Systemen ist dadurch gekennzeichnet, daß nur *eine* Verbindung zwischen Aufnahme- und Wiedergabeapparat vorhanden ist, auf der nacheinander die 3 Farbsignale übertragen werden. Die Geräte für die Bildaufnahme und die Bildwiedergabe können, wie schon gesagt wurde, gleich sein wie bei den Simultan-Verfahren. Wie Abb. 2 zeigt, ist jede der 3 Aufnahmeröhren mit einem Kontakt eines elektrischen oder mechanischen Umschalters verbunden, so daß jede Röhre

über diesen Schalter für ein bestimmtes Zeitintervall an der Übertragungsleitung oder dem Sender angeschlossen ist. Auf der Empfangsseite verteilt ein gleicher, synchron und in Phase arbeitender Umschalter die Signale auf die 3 vorgesehenen Empfängerrohren.

Während eines willkürlichen Zeitintervalles ist eine bestimmte Fernseh-Aufnahmeröhre (z. B. Rot) mit der Wiedergaberöhre gleicher Farbe verbunden, in den 2 nächsten Intervallen die beiden anderen

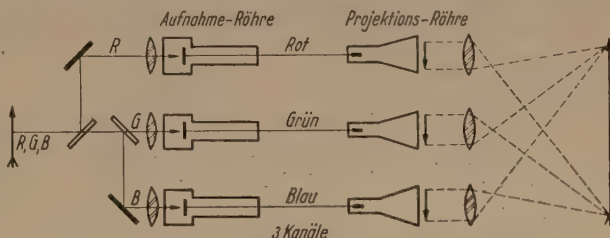


Abb. 1. Farbfernseh-Anordnung, Simultan-Verfahren.

Farben. Durch den Umschalter findet eine Vielfachausnutzung eines Kanals für mehrere (in diesem Fall 3) Signalquellen bzw. Empfänger statt. Eine derartige Vielfachausnutzung ist aus der Telegraphie bekannt unter der Bezeichnung „absatzweise Telegraphie“ oder als „Zeit-Multiplex“-Verfahren, im Gegensatz zur Vielfachausnutzung einer Leitung durch eine Anzahl von Wechselströmen verschiedener Frequenzen, die *gleichzeitig in der einen Leitung* fließen und durch Siebketten u. dgl. am Sender und Empfänger aufgeteilt werden.

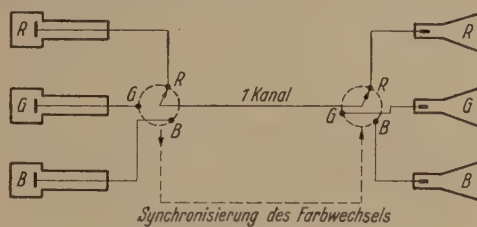


Abb. 2. Farbwechsel-Verfahren.

Das Zeitintervall, in dem bei der absatzweisen Übertragung der 3 Farbsignale nach Abb. 2 je ein Farbsender mit seinem Empfänger verbunden ist, kann gleich sein der Dauer eines Bildrasters oder einer Bildzeile oder eines Bildpunktes. Dementsprechend führen die Verfahren im englischen Sprachgebrauch die Bezeichnungen: field-sequential, line-sequential und dot-sequential method. Wir werden diese 3 Fälle als Farbwechsel in Raster-, Zeilen- bzw. Punktfolge bezeichnen.

Es liegt am nächsten, die Farbumschaltung am Beginn der Abtastung eines Bildes vorzunehmen. Da beim Schwarz-Weiß-Fernsehen in Europa 25 Bilder pro Sekunde, in Amerika 30 Bilder pro Sekunde übertragen werden, würde also der Farbwechsel 25mal bzw. 30mal in der Sekunde vorgenommen werden. 25 oder 30 Farbwechsel werden aber vom Auge als unerträgliches Flimmern empfunden, so daß aus diesem Grunde ein Farbwechsel mit Bildfrequenz nie in Frage stand.

Das Schwarz-Weiß-Bild wird bekanntlich zur Verringerung des Flimmerns im „Zeilensprung“ so abgetastet, daß die gesamte Bildfläche 2mal innerhalb der für ein Bild zur Verfügung stehenden Zeit über-



strichen wird. Jedes Halbbild (Raster) enthält nur die Hälfte der vorgesehenen Zeilen: das erste abgetastete Raster besteht aus den Zeilen 1, 3, 5 ..., das folgende Raster aus den Zeilen 2, 4, 6 ...

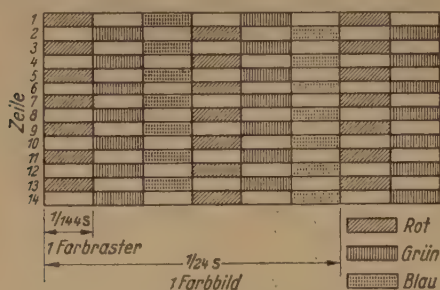


Abb. 3. Farbwechsel in Rasterfrequenz.

Ein Farbwechsel zu Beginn eines neuen Rasters ist in Abb. 3 schematisch dargestellt. Im ersten Farbraster werden alle ungeradzahigen Zeilen der „roten“ Aufnahmerröhre übertragen, anschließend

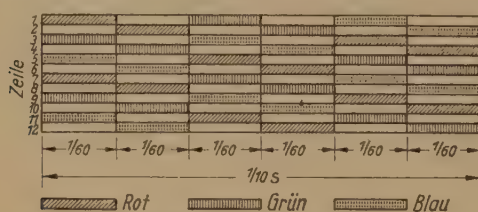


Abb. 4. Farbwechsel in Zeilenfrequenz.

im zweiten Raster die geradzahigen „grünen“ Zeilen usw. Da jedes Raster nur die Hälfte der Zeilen und jeweils nur eine bestimmte Farbe enthält, sind sechs Raster für die Wiedergabe eines vollständigen Farb-



Abb. 5. Farbwechsel in Bildpunktfrequenz.

bildes notwendig. Wie aus den in Abb. 3 angegebenen Zeiten zu ersehen ist, muß die Rasterfrequenz mit Rücksicht auf das Farbflimmern höher sein als für das übliche Schwarz-Weiß-Fernsehen.

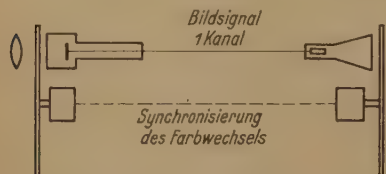


Abb. 6. Farbwechsel in Rasterfrequenz durch rotierende FarbfILTER.

An Stelle von 50 bzw. 60 Rastern pro Sekunde beim monochromen Fernsehen sind wenigstens 144 Raster pro Sekunde im Farbfernsehen zu schreiben. Im Ganzen werden nach dem in Abb. 3 gezeichneten Abtastschema 24 Farbbilder in der Sekunde übertragen.

Erfolgt der Farbwechsel, d. h. die Umschaltung des Verteilers am Beginn jeder Zeile (Abb. 4), kann die Zahl der Raster gleich sein wie bei Schwarz-Weiß-Bild. Es werden dann aber im Ganzen nur 10 vollständige Farbbilder wiedergegeben.

Eine dritte Möglichkeit für die Farbfolge besteht in der Umschaltung der 3 Kameras bzw. der Empfänger in Bruchteilen einer Zeile, also etwa jedem Bildelement. Abb. 5 gibt eine Darstellung der Verteilung der Farbpunkte längs einer Zeile und verschiedenen Rastern (dot sequential color system) in Verbindung mit dem üblichen Zeilensprungverfahren. Bei der Bildabtastung nach Abb. 5 wird gleichzeitig Gebrauch gemacht von dem sog. „Punktsprung“, ein Prinzip, auf das später noch eingegangen werden soll. Zeilen- und Punktsprung zusammen ermöglichen die Herabsetzung der Zahl der vollständigen Bilder auf 15 in der Sekunde.

Farbbilder, bei denen die Farbe in Zeilen- oder in Punktfolge wechselt, haben gleiches Flimmern wie Schwarz-Weiß-Bilder. Da außerdem die meisten Phosphore mit einer Zeitkonstante von etwa  $10^{-3}$  s abklingen, leuchten nacheinander angeregte Farbpunkte oder Farbpunkte innerhalb des Abklingens gleichzeitig.

Beim Farbwechsel in Rasterfolge ist bei Beginn der Aufzeichnung eines Farbrasters die Lichtemission des vorhergehenden Rasters völlig abgeklungen. 3 Lichtreize folgen für das Auge zeitlich getrennt, wie die eigentliche elektrische Übertragung. Auf diesem Grund ist der Farbwechsel in Rasterfolge besonders kritisch in bezug auf Flimmern und andere, mit der zeitlichen Verschiebung der 3 Teilbilder zusammenhängende Effekte. Bewegte Objekte erhalten bunte Ränder (color fringes) oder werden bei genügend rascher Bewegung als 3 getrennte Abbildungen in den verschiedenen Grundfarben produziert.

Trotz dieser Nachteile hat der Farbwechsel in Rasterfolge gegenüber den beiden anderen Verfahren und gegenüber der simultanen Übertragung der 3 Grundfarben so viele Vorteile, daß das erste praktisch eingeführte System nach diesem Prinzip arbeitet. Es soll deshalb bereits hier als Sonderfall der Farbfolge-Verfahren kurz skizziert werden.

### c) Farbwechsel durch rotierende FarbfILTER.

Wie Abb. 6 zeigt, läßt sich der rasterfrequente Farbwechsel sehr einfach durch eine rotierende Farbscheibe vornehmen. Diese Scheibe enthält 6 Segmente zweimal die FarbfILTER rot, grün und blau. Durch einen mit der Rasterfrequenz synchron laufenden Motor angetrieben, dreht sich die Farbscheibe während eines Rasters ( $1/144$  sec) um eine FarbfILTER. Das zu übertragende farbige Objekt wird durch das rotierende FarbfILTER hindurch mit einer Linse auf einer Fernseh-Aufnahmerröhre, z. B. einem Super-Ikonoskop abgebildet. Während eines Rasterdauern fällt also nur Licht einer der 3 Grundfarben in die Aufnahme-Kamera. Die Photokathode der Aufnahmerröhre muß für alle 3 Grundfarben gleich empfindlich sein.

Vor dem Bildschirm der Empfangsröhre rotiert eine gleiche Filterscheibe synchron und konphas mit derjenigen am Sender. Die Wiedergaberöhre enthält einen Phosphor, der weißes Licht emittiert.



Der elektrische und der optische Aufwand einer partigen Farbübertragung ist denkbar klein. Am der ist nur eine Aufnahmeröhre notwendig, auf der nur ein Bild entworfen wird. Der Empfänger hat nur eine Kathodenstrahlröhre der üblichen Aus- rüstung, der Empfangsapparat enthält praktisch nicht viele Verstärkerröhren wie ein Schwarz-Weiß- empfangsapparat. Die Wiedergabe der Farbe ist ebenso wie bei den besten Farbfilmen. Auf die gegen- wärtigen „mechanischen“ Farbfernseher erhobenen An- wände wird später eingegangen werden.

Da für alle Simultan- und Farbwechsel-Verfahren mit Ausnahme des zuletzt genannten — die opti- sche Aufteilung des Farbbildes in 3 Teilbilder am Empfänger und die additive Mischung am Empfänger gleich ist, sollen diese beiden Aufgaben getrennt be- trachtet werden. Zuvor sei kurz die Frage der Fre- quenzbandbreite einer Farb-Fernseh-Übertragung und die Vorschläge zur Herabsetzung derselben be- handelt.

### C. Bandbreite für Dreifarbf-Verfahren.

Wenn den folgenden Bemerkungen über Band- breite einer Farbsendung die USA-Fernseh-Normen zugrunde liegen, so hat dies 2 Gründe: alle Versuche, die in diesem Bericht referiert wird, verwenden die amerikanische Norm. Außerdem führen die Un- terschiede in der amerikanischen und europäischen Bildfrequenz (30 bzw. 25 Bilder pro Sekunde, also 60 bzw. 50 Raster) in bezug auf Flimmern zu völlig anderen Werten. So beträgt die zulässige Bild- lichkeit für einen bestimmten Abstand des Be- trachters vom Bild das 6—7 fache bei 60 Rastern verglichen mit dem Wert bei 50 Rastern.

Die beim Abtasten eines Bildes entstehende maxi- male Frequenz hat folgende Größe:

$$f_{max} = \frac{1}{2} k m n^2 f \left( \frac{b}{h} \right) \left( \frac{k_v}{k_h} \right) \text{ Hz.}$$

in bedeutet  $f$  die Zahl der Bilder pro Sekunde,  $n$  die Zahl der Zeilen pro Bild,  $m$  das Verhältnis von horizontaler zu vertikaler Auflösung,  $b$  die Bild- breite,  $h$  die Bildhöhe,  $k_v$  bzw.  $k_h$  Konstante, die das Verhältnis der ausgenutzten Bild- bzw. Zeilen- weite zur gesamten Bild- bzw. Zeilendauer angeben und  $k$  schließlich eine Konstante, welche die Verrin- gerung der Vertikalaufklärung durch die feste Lage der Zeilen berücksichtigt, und für die nach bis- herigen Erfahrungen der Wert 0,7 zu setzen ist.

Für  $m = 1$ ,  $n = 525$ ,  $f = 30$ ,  $b/h = 4/3$ ,  $k_v/k_h = 0,94/83$ , beträgt die maximale Bildfrequenz

$$f_{max} = 4,4 \text{ MHz.}$$

Ein hochfrequenter Schwarz-Weiß-Fernsehkanal nach amerikanischer Norm die in Abb. 7 gezeig- ten Werte: 6 MHz gesamte Bandbreite, maximale Bildfrequenz = 4,0 MHz, Abstand des Bild- und Tonträgers 4,5 MHz. Bei gleicher Bildauflösung und gleicher Anzahl Bilder pro Sekunde würde eine Fern- seh-Übertragung in 3 Farben die 3 fache Videoband- breite beanspruchen, also wenigstens 12 MHz, unab- hängig davon, ob die 3 Farbsignale gleichzeitig über hochfrequente Kanäle oder nacheinander in einem Kanal übertragen werden.

Zu Beginn des Farbfernsehens wurde allgemein angenommen, daß die Auflösung der 3 Primärbilder

gleich sein sollte. Die Auflösung des zusammenge- setzten Farbbildes wäre dann ebenfalls gleich der der Primärbilder, vorausgesetzt, daß diese sich bei der Farbmischung völlig decken.

Die ersten Farbübertragungen der CBC wie der RCA teilten jedem Farbauszug ein Band von 4 MHz zu. Erst als durch das etwa 1949 einsetzende rapide Anwachsen der Fernseh-Industrie die Nachfrage nach Sendewellen wesentlich größer wurde, und die Sender nicht mehr in dem für Fernsehen vor- gesehenen Frequenzgebiet untergebracht werden konnten, wurde von der Industrie und der FCC die Forderung erhoben, die Bandbreite einer Farb- sendung auf das gleiche Frequenzband zu be- schränken wie eine Schwarz-Weiß-Sendung. Ein Teil der Radio-Industrie verlangte gleichzeitig, daß nur solche Farbsysteme zur Einführung zugelassen werden sollten, deren Abtastnormen mit den für Schwarz-Weiß-Bilder bestehenden Normen so weit übereinstimmen, daß eine Farbsendung mit jedem Schwarz-Weiß-Empfänger als monochromes Bild aufgenommen werden könne. Ein Farb-Sendever- fahren sollte mit den bestehenden Schwarz-Weiß- Verfahren verträglich sein (compatible).

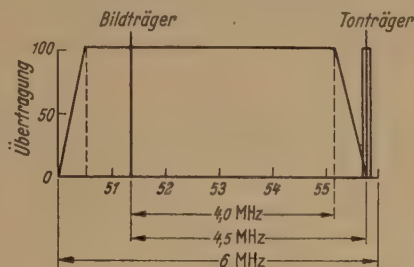


Abb. 7. Fernsehkanal für Schwarz-Weiß, USA-Norm.

Für die Simultan-Verfahren war der einfachste Weg zur Verringerung der gesamten Bandbreite die Herabsetzung der Bildauflösung für das rote und das blaue Bild. Nach Messungen von LUCKIESH [14] ist die Sehschärfe bei 40 Lux Helligkeit für Gelb und Weiß am größten, für Rot und Blaugrün etwa 90% und für Blau-violett etwa 75%. Nach späteren Versuchen nimmt das Auflösungsvermögen um den Fak- tor 2 zu, wenn die Beleuchtung von 10 auf 100 Lux erhöht wird. Der Helligkeitswert der blauen Primär- farbe eines Farbbildes beträgt nicht 10% derjenigen der grünen Grundfarbe. Mit Rücksicht darauf be- trägt das Auflösungsvermögen für das blaue Bild nur etwa 35% derjenigen für das grüne Bild. Für das rote Bild schließlich liegt die Auflösung bei 75% des Grün-Bildes.

Über die Frage der Sehschärfe in den verschie- denen Spektralgebieten und ihre Abhängigkeit von der Helligkeit und vom Kontrast liegen einige neue Untersuchungen vor, so die von BALDWIN JR. [15], von WALLS [16] und die von JESTY und PHELPS [17], ohne daß hiermit alle das Farbfernsehen berühren- den Probleme als geklärt betrachtet werden könnten. Es sei auf einen Bericht über den Einfluß des Farb- kontrastes auf die Sehschärfe verwiesen [18].

Das verschiedene Auflösungsvermögen des Auges für die 3 Grundfarben veranlaßte KELL und seine Mitarbeiter [19], bereits 1946 die Auflösungen für das rote und blaue Farbbild zuerst auf die Hälfte, später auf ein Drittel des grünen Bildes herabzu-



setzen. Auf diese Weise konnte die gesamte Bandbreite auf 6—8 MHz verringert werden (s. Abschn. G).

Nach einem Vorschlag von A. V. BEDFORD [20] soll die Bandbreite auf folgendem Wege verkleinert werden: das Farbbild wird in 3 Farbauszüge kleiner Auflösung und in ein Schwarz-Weiß-Bild mit allen hochfrequenten Details aufgeteilt. Für die Farbauszüge wurden 3 schmale Frequenzbänder von je 0,1 MHz vorgesehen. Die gesamten höheren Frequenzen der 3 Auszüge sollten bereits am Sender im Anschluß an die 3 Aufnahme-Kameras gemischt werden und dieses Mischsignal, das die Bezeichnung „mixed high frequencies“, abgekürzt „mixed highs“ führt, soll zusammen mit den 3 Farbbändern dem Fernsehsender aufmoduliert werden. Dieses Mischsignal stellt, von den fehlenden tiefen Frequenzen

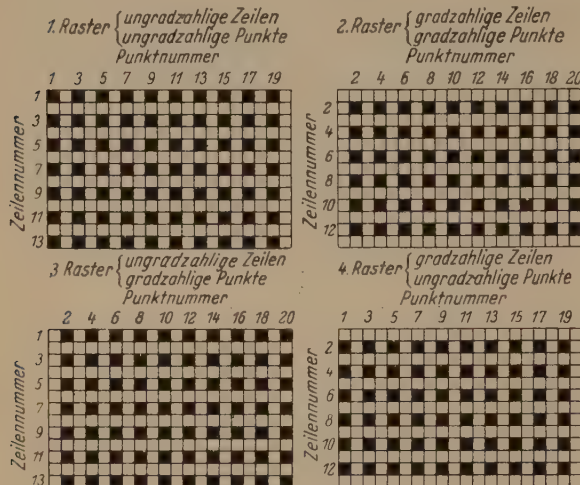


Abb. 8. Punktsprung-Verfahren.

abgesehen, ein Schwarz-Weiß-Bild in normaler Auflösung dar.

Durch Frequenzbänder von 0,1 MHz kann nur die Farbkomponente von Flächen wiedergegeben werden, die mehrere Bildelemente umfassen. Eine derartige Aufteilung liefert bestenfalls kolorierte Bilder mit völlig falschem Weißgehalt. Es zeigte sich bald, daß es nötig war, die Überschneidung der beiden Frequenzgebiete (crossover) wesentlich höher zu legen, mindestens auf 1 MHz. Mit der Beschränkung der Farbauszüge auf 1 MHz und der „mixed highs“ auf das Gebiet von 1—4 MHz wäre die gesamte Bandbreite einer Farbsendung  $(3 \times 1) + 3 = 6$  MHz. Gegenüber einem Simultan-Verfahren, bei dem alle 3 Grundfarben die gleiche Bandbreite besitzen, wäre nach dem Vorschlag von BEDFORD die Bandbreite für die Farbübertragung auf die Hälfte reduziert.

Eine weitere Reduktion der Bandbreite bei gleichbleibender Bildauflösung brachte die Herabsetzung der Bildzahl, die bei erträglichem Flimmern ermöglicht wurde durch Benutzung des sog. „Punktsprunges“.

Das übliche Zeilensprung-Verfahren verringert das Flimmern durch Verdopplung der Anzahl der Raster und ermöglicht dadurch bei 30 Bildern pro Sekunde Schirmhelligkeiten bis etwa 1000 Lux und damit die Betrachtung von Fernsehbildern bei üblicher Raumbelichtung. Für das Flimmern über

große Flächenanteile des Bildes ist entscheidend diese 60 mal pro Sekunde (= Rasterfrequenz) im Auge eintreffen. In kleinen Flächengebieten, bei denen dabei immer noch ein Flimmern auftreten, da ja eine Zeile oder jedes Bildelement tatsächlich nur 30 mal pro Sekunde beleuchtet wird. Es ist bekannt, daß die Vorteile des Zeilensprung-Verfahrens durch einige sehr erhebliche Nachteile erkauft sind, darunter das Zwischenzeilenflimmern.

Diese Nachteile sind der Grund, weshalb kontinuierlichere Zeilensprungmethoden nicht eingeführt wurden. Ein vierfacher Zeilensprung z. B., würde bei einer bestimmten, mit Rücksicht auf das Flimmern festgelegten Rasterzahl, etwa 60 Raster pro Sekunde, die Zahl der Bilder pro Sekunde halbieren und damit bei unveränderter Zeilenzahl die Bandbreite halbieren. Leider zeigt ein derartiger Zeilensprung ein noch stärkeres Zwischenzeilenflimmern als der Sprung 2 : 1.

Der Zeilensprung 2 : 1 mußte trotz seiner Nachteile auch für das Farbfernsehen beibehalten werden, falls die gesamte Frequenzbandbreite möglichst erhalten bleiben sollte. Das Zwischenzeilenflimmern ist im Farbfernsehen wegen des Helligkeitsunterschiedes nebeneinanderliegender Zeilen oder Punkte verschärft, da die Farbe der Zeilen wesentlich größer als beim Schwarz-Weiß-Fernsehen ist. Trotzdem hat man sich entschlossen, zum Zeilensprung noch den Punktsprung hinzuzunehmen.

Beim Punktsprung werden bei Abtastung einer Zeile zunächst nur die Hälfte aller Bildelemente abgetastet, und am Empfänger werden nur die Hälfte der Bildpunkte am Leuchtschirm angeregt. Die zweite Hälfte der Bildpunkte wird bei der nächsten Übertragung in die erste Gruppe „eingeschoben“. Abb. 8 zeigt die Verteilung der Bildpunkte für ein Schwarz-Weiß-Bild, wenn gleichzeitig Zeilen- und Punktsprung angewandt werden. Das einfachste Verfahren zur Erzeugung eines derartigen Punktsprunges besteht in einer ruckweisen Bewegung des Brennfleckes, der also während einer gewissen, durch die Abtastnorm vorgegebenen Zeit auf einem bestimmten Bildelement stillsteht (gewöhnlich etwa  $1 \cdot 10^{-7}$  sec), dann unter Auslassung eines Bildelementes zum nächsten Punkt „springt“. Die meisten Verfahren zur Erzeugung des Punktsprunges sind mit erheblichem Aufwand verknüpft, weshalb beim Schwarz-Weiß-Fernsehen kein Gebrauch davon gemacht wurde. Durch Anwendung des Punktsprunges kann bei gleichem Großflächenflimmern die Zahl der übertragenen Bilder auf 15 verringert werden. In 4 Rastern sind jeweils alle Zeilen und alle Punkte einmal abgetastet.

Wenn bei Verwendung des Punktsprunges das Flimmern über größere Flächenteile auch noch bei 15 Bildern pro Sekunde erträglich bleibt – werden ja nach wie vor 60 Raster geschrieben – dürften bei dieser Bildzahl Bewegungen im Bild bei normaler Geschwindigkeit nicht mehr kontinuierlich erscheinen, sondern mehr oder weniger ruckartig. Nach Erfahrungen des Filmes sind 16 Bilder pro Sekunde die unterste Grenze. Der Punktsprung vermindert außerdem das gleiche Flimmern zwischen benachbarten Punkten wie der Zeilensprung zwischen benachbarten Zeilen. Punkt- und Zeilensprung zusammen geben eine erhebliche Bildunruhe.



Grundsätzlich kann aber durch den Punktsprung die Bandbreite auf die Hälfte herabgesetzt oder bei gegebener Bandbreite die Auflösung z. B. in horizontaler Richtung vergrößert werden. Die Auflösung wird nicht, wie man erwarten würde, verdoppelt, die Zunahme beträgt nur etwa 50%. Bei einer normalen Zeilenabtastung mit kontinuierlicher Bewegung eines Lichtfleckes über eine Zeile stellt die Abtastung Helligkeitsänderungen fest unabhängig von ihrer Lage. Die Auflösung ist nur begrenzt durch die Größe des Lichtfleckes und durch die Bandbreite der Bildkanäle. Beim Punktsprung hingegen tastet der Lichtfleck nur diskrete festliegende Elemente einer Zeile ab. Da bei jedem Bild die Helligkeitsverteilung zufällig ist, gehen bei Abtastung im Punktsprung eine Anzahl Details der Zeile verloren. Aus demselben Grunde ist die Vertikalauflösung eines Fernsehbildes nicht gleich der Zeilenzahl, sondern, da die Zeilen diskrete Lagen einnehmen, etwa 70% von der Zeilenzahl. Die Verringerung der Vertikalauflösung wurde in der S. 303 angegebenen Formel durch den Faktor  $k = 0,7$  berücksichtigt.

Das neueste Farbverfahren der RCA macht vom Punktsprung Gebrauch. Durch gleichzeitige Anwendung des Prinzips der „mixed highs“ gelang es, die Bandbreite für das Farbfernsehen auf 4 MHz zu reduzieren. Im Prinzip kann also heute in dem gleichen Frequenzband, das bisher für eine Schwarzweiß-Sendung benötigt wurde, ein Farbbild gleicher Auflösung übertragen werden. Da außerdem Raster- und Zeilenfrequenz unverändert sind gegenüber den am Beginn dieses Abschnittes genannten Werten, kann jeder Fernsehempfänger ein monochromes Bild einer Farbsendung der RCA-Norm aufnehmen.

Durch die bisher besprochenen Maßnahmen, wie Punktsprung und Zeilensprung, wird die Zahl der pro Sekunde übertragenen Bilder herabgesetzt. Ohne die Zeilenaufklärung oder die Zahl der Bilder pro Sekunde zu ändern, kann eine Verringerung der Bandbreite durch eine bessere Ausnutzung des Frequenzspektrums eines Fernsehsenders erreicht werden. Diese Vorschläge gehen zurück auf die Arbeiten von MERZ und GRAY [21] und von DOME [22], [23]. Es wird später im Zusammenhang mit dem Farbverfahren der RCA darauf eingegangen werden.

#### D. Erzeugung der Farbauszüge an der Aufnahmeseite.

##### a) Punktweise Abtastung des Objektes.

Die ersten systematischen Farbfernseh-Versuche wurden in den BELL-Laboratorien ausgeführt. H. E. MERZ und A. L. JOHNSRUD [24] beschrieben 1929 Sender und Empfänger einer Dreifarb-Übertragung, bei der die Zerlegung des Bildfeldes mechanisch mit einer Perforations-Scheibe vor sich ging. Die Zeilenzahl betrug damals noch 50 Linien pro Bild. Durch eine Perforations-Scheibe mit 50 auf einer Spirale angeordneten Löchern wurde das Objekt punktweise mit dem weißen Licht einer Bogenlampe beleuchtet und bei jeder Umdrehung der Scheibe ein Mal abgetastet. Das diffus reflektierte Licht fiel auf 3 Gruppen von Photozellen, die durch vorgesetzte Filter für je eine Grundfarbe empfindlich waren. Jede Photozelle wirkte über einen eigenen Verstärker und ein Kabel einer in einer bestimmten Grundfarbe leuchten-

den Glühlampe am Empfänger. Da das Objekt mit weißem Licht punktförmig abgetastet wurde und die Trennung der 3 Farben erst nach der Abtastung geschah, waren alle Überdeckungsschwierigkeiten vermieden.

Bei dem von R. D. KELL und seinen Mitarbeitern in den Laboratorien der RCA in den Jahren 1946—47 entwickelten simultanen Farbfernseh-Verfahren [19]

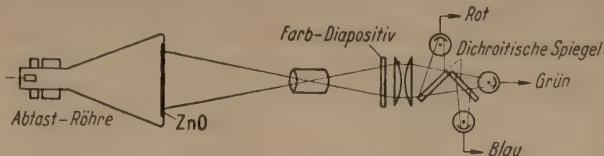


Abb. 9. Leuchtschirm-Abtaster für 3 Farben, Farbteilung durch dichroitische Spiegel.

wurde aus demselben Grunde der Abtastvorgang und die Farbaufteilung getrennt. Das farbige Objekt wird also durch weißes Licht punktwise abgetastet und die Farben werden durch Filter aussortiert. Abb. 9 zeigt schematisch den verwendeten Abtaster für farbige Diapositive und Filme. Die Abtast-Lichtquelle ist eine Kathodenstrahlröhre mit einem Leuchtschirm von möglichst kurzer Nachleuchtdauer (flying spot scanner). Nach Untersuchungen von KAROLUS und WOLF [25] ist Zinkoxyd unter allen bis heute bekannten Phosphoren hierfür am besten ge-

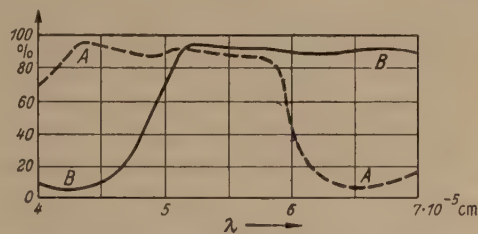


Abb. 10. Spektrale Charakteristik der 2 dichroitischen Spiegel der Abb. 9.

eignet. Das im Gelbgrünen emittierte Licht des Zinkoxyd klingt in etwa  $1 \cdot 10^{-5}$  sec auf  $1/e$  ab, eine im nahen UV erregte Bande etwa innerhalb  $1 \cdot 10^{-7}$  sec. Für eine Farbwiedergabe kann von dem praktisch trägheitsfrei abklingenden ultravioletten Anteil allerdings kein Gebrauch gemacht werden.

Das auf der Abtastrohre geschriebene Raster wird durch ein Objektiv auf dem Farbdiaapositiv abgebildet. Das von diesem durchgelassene Licht wird auf 3 Photozellen verteilt, so daß jede Photozelle nur Licht einer Grundfarbe erhält. Der Phosphor sollte möglichst weißes Licht emittieren, d. h. Rot, Grün und Blau in solchen Anteilen, daß die in den 3 Photozellen ausgelösten Ströme nach Berücksichtigung der Verluste durch die 3 Farbfilter etwa gleich groß sind. Leider ist der Rotanteil der Lumineszenz des Zinkoxyds wesentlich kleiner als der Anteil an blauem und grünem Licht.

An Stelle der früher verwendeten Farbfilter, welche auch im durchgelassenen Bereich eine erhebliche Absorption besitzen, verwendet man heute zur Aufteilung der Farben dichroitische Interferenzfilter, die einen bestimmten Bereich des Spektrums durchlassen, den Rest reflektieren. Aufbau und Leistung solcher Filter sind u. a. von DIMMIK [26] beschrieben worden.

Die im Farbabtaster der RCA benutzten dichroitischen Spiegel hatten die in Abb. 10 gezeigte spek-



trale Durchlässigkeit. Es handelt sich also um Stufenfilter (Hoch- und Tiefpässe). Diese Filter haben im Durchlaßbereich nur wenige Prozent Absorption. In dem Aufbau der Abb. 9 reflektiert der erste nach dem Kondensor angeordnete Spiegel praktisch den ganzen roten Lichtanteil des Farbbildes (Kurve A in Abb. 10), während das blaue und grüne Licht durchgelassen werden. Am zweiten Spiegel (Kurve B in Abb. 10) wird ebenso vollständig der blaue Anteil reflektiert und der durchgelassene grüne Anteil fällt

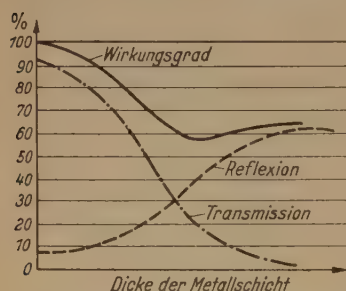


Abb. 11. Durchlässigkeit, Reflexion und Wirkungsgrad einer dünnen Metallschicht.

absorption. Abb. 11 zeigt die Reflexion, die Durchlässigkeit und den Wirkungsgrad einer Metallschicht (Chrom) mit zunehmender Schichtdicke. Der Lichtgewinn durch die Interferenzspiegel beträgt fast eine Größenordnung.

Die Photozellen für die 3 Grundfarben werden in ihrer spektralen Empfindlichkeit der aufzunehmenden Farbe angepaßt. Für den roten Anteil werden daher CsO-Zellen auf Ag, für den blauen und grünen Anteil SbCs- oder BiCs-Zellen verwendet. Falls die

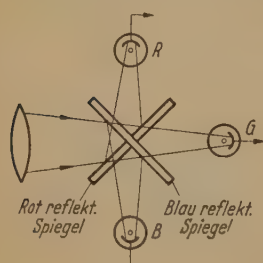


Abb. 12. Optik mit gekreuzten dichroitischen Spiegeln.

reflektieren die beiden anderen Komponenten zu den entsprechenden Photozellen.

Die in Abb. 9 und 12 gezeichneten Photozellen sind jeweils mit einem mehrstufigen Sekundärelektronen-Vervielfacher vereinigt, da hierdurch bekanntlich das Verhältnis Signal zu Rauschen wesentlich günstiger wird als bei Verwendung normaler Röhrenverstärker. Die Verstärkung der 3 Multiplier wird so geregelt, daß die Ausgangssignale für die 3 Farben etwa gleich sind und daß am Empfänger nach der Farbmischung „Weiß“ entsteht bei Verwendung von 3 Lichtquellen mit vorgegebener spektralen Energieverteilung.

Ein Lichtstrahl-Abtaster, wie der eben beschriebene, liefert in Verbindung mit Sekundäremissions-Vervielfachern in jedem Kanal ein Signal, das dem Farbanteil eines Bildelementes proportional ist. Die Lichtcharakteristik der üblichen Kathodenstrahl-Empfangsröhre verläuft jedoch nicht linear. Bei

kleinen Lichtwerten ist für eine bestimmte Li-änderung eine wesentlich größere Steuerspannung notwendig als bei höheren. Es muß daher für Farbe ein nichtlinearer Verstärker vorgesehen werden mit einer der Wiedergaberöhre reziproken Kennlinie, so daß Aufnahme- und Wiedergabe-Lichtstrahl proportional werden. Für jede Farbe ist außer Gamma-Korrektur eine Entzerrung des Lichtstrahls der Abtaströhre erforderlich.

Die gleiche Anordnung, wie sie Abb. 9 zeigt, kann zur Abtastung von Farbfilmen dienen. Der räumliche Transport des Filmes läßt sich aber nicht in der Zeit des Bildrücklaufes durchführen. Um den Bildverlust zu vermeiden, transportiert man Film zweckmäßigerweise durch einen Projektor optischem Ausgleich [25]. Damit kann jeder normale Farbfilm, dessen genormte Bildzahl 24/sec beträgt, unabhängig von dem gewählten Zerlegerschema genutzt werden.

#### b) Bildaufteilung in 3 Teilbilder.

Der Leuchtschirm-Abtaster ist nicht brauchbar zur Übertragung von großen Szenen oder von Aufnahmen. In diesem Fall können die Farbaufnahmen nur so erzeugt werden, daß für jede Farbe eine getrennte Aufnahmeröhre vorgesehen wird, wie schematisch in Abb. 1 gezeigt wurde. Als Aufnahmeröhre wird für Farbfernsehen ausschließlich Image-Orthicon verwendet [27]. Gegenüber dem Super-Ikonoskop besitzt das Image-Orthicon hier entscheidenden Vorteil, daß sein Bildsignal frei von „Störsignal“ ist, dessen Kompensation 3 Aufnahmeröhren zu einem enormen apparativen und personellen Aufwand führen würde. Ein Nachteil des Image-Orthicon besteht in seiner Störempfindlichkeit auf magnetische Fremdfelder. Bei einer Schwarz-Weiß-Aufnahme durch ein Orthicon bleiben magnetische Wechselfelder, welche Störungen der Bildgeometrie um einige Bildelemente erzeugen, nicht sichtbar. Wirken aber bei einer Farbübertragung Wechselfelder in verschiedener Größe auf die 3 Teilbilder ein, so erzeugen sie an einem weißen Objekt farbige Ränder, wenn die Bildgeometrie der 3 Teilbilder nur um 1 Bildelement differiert.

Die 3 Teilbilder müssen geometrisch völlig gleich sein. Zur Vermeidung der räumlichen Parallaxe verlegt man wie bei den Farbfilmkameras die Strahlenteile in einen Teil der Aufnahmeoptik verlegen, in dem der Strahlenbüschel achsenparallel verlaufen. Im Gegensatz zu dem Schema in Abb. 1 werden tatsächlich nicht 3 Aufnahmeobjektive verwendet, sondern ein abbildendes optisches System, das gleichzeitig 3 in einer Ebene nebeneinander angeordnete, kongruente Bilder erzeugt. Die gleiche Toleranz, innerhalb der die 3 Teilbilder geometrisch übereinstimmen müssen, wird für die elektronenoptische Abbildung der Photokathode auf dem Speicherschirm verfahren ebenso für die Abtastung des Speicherschirmes. Die 3 Abtastraster müssen nach Form und Größe in der halben Bruchteile eines Bildelementes gleich sein. Schaltet man Bild- und Zeilen-Ablenkspulen an 3 Kameras jeweils in Serie, so sind die Ablenkstrahlen in jedem Zeitmoment gleich. Die Ablenkungen der 3 Kameras decken sich nur dann, wenn die Spulen gleiche Abmessungen und gleiche Wicklungen aufweisen und die Lagen derselben entsprechend schräg fältig justiert sind.



Im Ganzen gesehen ist also die Verwendung dreier trennter Fernseh-Aufnahmeröhren zur Erzeugung der 3 Farbbilder möglich, der Aufwand und die Störfähigkeit sind aber so groß, daß ein Farbverfahren, das mit einer Kamera auskommt, im Betrieb wesentlich überlegen ist. Ein derartiges Verfahren besteht dem bereits an Hand von Abb. 6 besprochenen Farbwechselverfahren durch eine rotierende Filterheibe.

Die Verwendbarkeit der Bilderlegerröhre von FARNSWORTH zur Abtastung von Farbbildern wurde durch B. ERDE [28] untersucht. Da für ein simultanes Farbverfahren 3 derartige Zerlegerröhren notwendig wären mit allen Schwierigkeiten der Deckung der 3 Teilbilder, besteht kein Vorteil gegenüber der Abtastung durch einen Leuchtschirm. Da zudem die Bilderlegerröhre von FARNSWORTH nicht speichert, kann sie nur zur Zerlegung von Diapositiven und Filmen eingesetzt werden.

### Die Mischung der 3 Farbbilder am Empfänger.

Die grundsätzlichen Möglichkeiten zur additiven Mischung der 3 Farbreize wurden bereits in der Einteilung genannt. Mit Ausnahme des in Abb. 6 gezeigten Farbwechsels durch eine rotierende Filterheibe erzeugen alle übrigen Simultan- und Wechselverfahren am Empfänger 3 „räumlich“ getrennte Bilder und überlagern diese 3 Farbbilder im Auge. Nur falls sich die 3 Teilbilder bei dieser Überlagerung vollständig decken, wird die Farbe jedes Bildelementes richtig wiedergegeben und das Bild ist frei von bunten Farbrändern, Farbfecken und analogen Störungen [48]. Die geforderte Passung setzt ähnlich wie bei der Aufnahme eine völlige Gleichheit der Bilder und die Strahlenvereinigung aller zusammengehörenden Bildelemente voraus.

Die 3 Farbbilder seien, wie in Abb. 1 dargestellt, auf 3 Bildröhren aufgezeichnet, die nur hinsichtlich des Phosphors verschieden sind. Die 3 Röhren müssen in ihren Abmessungen, besonders im Aufbau des Elektronenstrahlsystems, sehr genau gleich sein, ebenso die Ablenkspulen und deren Ströme. Auch bei allen Spannungsschwankungen müssen die 3 Teilbilder auf Bruchteile eines Bildelementes geometrisch übereinstimmen und ihre Lage unverändert bleiben, da sonst die optische Deckung der 3 Bilder auf einem gemeinsamen Schirm innerhalb 1/1000 der Linearabmessungen des Bildes nicht möglich ist.

Liegen die 3 Farbbilder über- oder nebeneinander einer Röhre (Abb. 13), so sind die Schwierigkeiten der optischen Deckung der Teilbilder unverändert. Die 3 Bilder seien in der Anordnung der Abb. 13b durch ein Strahlsystem geschrieben. Bei der Verwendung der üblichen Ablenkung entstehen 3 geometrisch verschiedene Bilder. Die Zeilenlänge muß durch eine zusätzliche Modulation der Ablenkströme an allen Stellen des Bildes auf den gleichen Betrag gebracht werden. Auch die Bildablenkung bedarf der Korrektur, da bei linearer Ablenkung der Abstand der Zeilen für das mittlere Bild völlig anders ist als für die beiden anderen Bilder. Zwingt man eine derartige Röhre zu einer wesentlich komplizierteren Ablenkung, so kann letztere gleichzeitig dazu dienen, die geometrischen Verzerrungen bei der Abbildung der 3 Bilder aufzuheben, anders ausgedrückt: man wird die Bild- und Zeilenablenkung

zusätzlich so modulieren, daß sich die übereinander projizierten Bilder decken.

Eine Aufteilung der Schirmfläche auf 3 Phosphore, die in horizontaler Richtung nebeneinander liegen (Abb. 13c), ermöglicht einen Farbwechsel in Zeilenfolge. Während einer Ablenkung in der Zeilenrichtung schreibt der Kathodenstrahl nacheinander eine rote, eine grüne und eine blaue Zeile.

Die in Abb. 13 dargestellte Röhre kann auch 3 Elektronenquellen mit unabhängiger Steuerung besitzen. Dann ist die Röhre auch zur Wiedergabe von simultan übertragenen Farbausügen geeignet.

Der Vollständigkeit halber sei erwähnt, daß sich die in 3 getrennten Röhren geschriebenen Farbbilder visuell dadurch zur Deckung bringen lassen, daß sie aus gleicher Richtung in das Auge des Betrachters einfallen. Unter Verwendung von dichroitischen Spiegeln können, wie Abb. 14 zeigt, die 3 Bilder in den 3 Grundfarben für einen Betrachter superponiert werden. Die beiden dichroitischen Spiegel können auch, ähnlich wie in Abb. 12 gezeigt wurde, gekreuzt angeordnet sein. Mit Rücksicht auf den Aufwand und den kleinen zulässigen Betrachtungswinkel dürfte eine derartige Farbmischung in Zukunft wenig Bedeutung besitzen. Vor der Entwicklung der Dreifarbröhre wurde sie für Demonstrationen vielfach benutzt.

In der in Abb. 13 gezeigten Röhre sind alle 3 Phosphore auf einem Bildschirm angeordnet, sie könnte deshalb bereits als Dreifarbröhre bezeichnet werden. Im Gegensatz zu den im Folgenden beschriebenen Farbröhren benötigt sie aber optische Hilfsmittel, um die 3 Teilbilder zu addieren.

### F. Die Dreifarbröhre.

Die Zahl der in der Patent- und Fachliteratur beschriebenen Ausführungsformen von Kathodenstrahlröhren zur Wiedergabe farbiger Bilder ist so groß, daß hier nur eine Übersicht über die verschiedenen Typen gegeben werden kann und nur für einige sollen Einzelheiten angeführt werden.

Zuerst seien 2 Prinzipien zur Farbsteuerung genannt, die interessant, aber bisher nicht verwirklicht worden sind. Die eine Farbsteuerung macht von der Abhängigkeit der Farbe gewisser Mischphosphore von der Stromdichte Gebrauch, die andere von der verschiedenen Eindringtiefe der Elektronen verschiedener Geschwindigkeit.

#### a) Farbsteuerung durch Änderung der Stromdichte.

Manche Mischphosphore ändern ihre Farbe mit wachsender Strombelastung. Da alle „weißen“ Phosphore aus verschiedenen „bunten“ Phosphoren

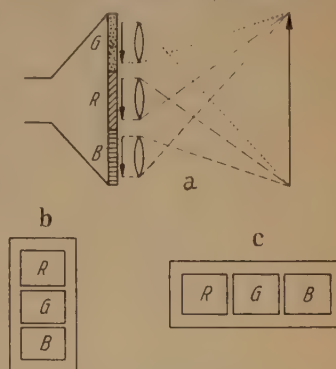


Abb. 13. Farb-wiedergaberöhre, Leuchtschirm in 3 Bildflächen mit versch. Phosphoren unterteilt.

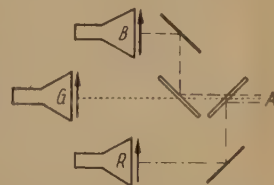


Abb. 14. Visuelle Vereinigung von 3 monochromen Teilbildern über dichroitische Spiegel.



gemischt sind, ist dieser Effekt bei einer Schwarz-Weiß-Röhre sehr unerwünscht [29]. Die Farbänderung entsteht dadurch, daß die verschiedenen Komponenten eines Mischphosphors bei verschiedener

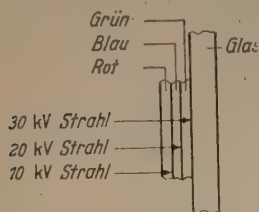


Abb. 15. Farbröhre mit 3 hintereinanderliegenden Phosphorschirmen, Farbsteuerung durch Änderung der Elektronengeschwindigkeit.

Stromstärke eine gewisse Lichtsättigung aufweisen. Der Effekt ist aber bisher gering, er kann aber zweifellos mit speziellen Leuchtstoffen zu einer brauchbaren Farbsteuerung führen.

#### b) Farbsteuerung durch Änderung der Elektronengeschwindigkeit.

Abb. 15 zeigt einen Leuchtschirm, bei dem die 3 Phosphorschichten (R, G, B) übereinanderliegen. Durchdringen Elektronen einer bestimmten Geschwindigkeit nur die erste Schicht, so regen sie nur den roten Phosphor an. Schnellere Elektronen erreichen die zweite Phosphorschicht und bringen den

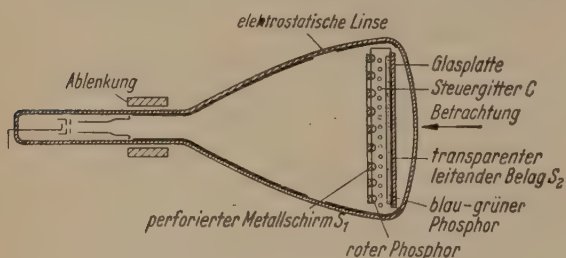


Abb. 16. Zweifarbröhre mit 1 Gun.

blauen Phosphor zum Leuchten, wogegen schließlich die schnellsten Elektronen nur den untersten Phosphor anregen. Da aber die Spannungsunterschiede von Phosphorschicht zu Phosphorschicht etwa 10 kV betragen müssen, ist die Umsteuerung der Farbe,

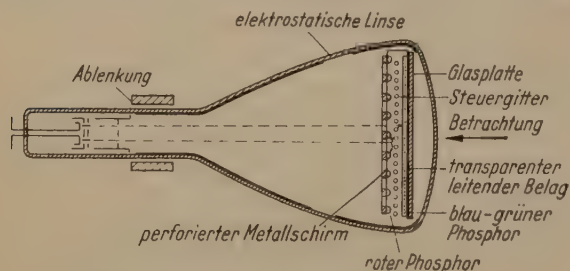


Abb. 17. Zweifarbröhre, 2 Gun auf versch. Potential.

besonders wenn sie in Zeilen- oder Punktfrequenz vor sich gehen soll, keine einfache Aufgabe. Auch die Gleichheit der Ablenkung bei den verschiedenen Elektronengeschwindigkeiten dürfte einige Schwierigkeiten bereiten.

#### c) 3 Phosphore auf getrennten parallelen Drahtnetzen.

In einer von A. B. BRONWELL [30] beschriebenen Farbröhre sind die 3 Phosphore auf getrennte Drahtnetze aufgetragen, die im Abstand von einigen Millimetern hintereinander im Weg des Kathodenstrahles liegen und die abwechselnd mit der Anoden-spannung verbunden werden. Außer der Gefahr der Moireebildung durch die Netze tritt infolge des Abstandes zwischen den einzelnen Phosphorschichten eine räumliche Parallaxe auf.

Einen Überblick über die bei der RCA entwickelten Dreifarbröhren gibt E. W. HEROLD [31]. Im folgenden sollen aus Veröffentlichungen der RCA einige Einzelheiten über die von FORGUE [32], WEIMER und RYNN [33], BOND, NICOLL und MOORE [34] und H. B. LAW [35] und R. LAW [36] entwickelten Typen angegeben werden.

#### d) 3 Phosphore hintereinander und Steuergitter zwischen den Phosphoren.

In der Farbröhre von FORGUE [32] liegen die Phosphorschirme mit Abständen von einige Millimetern hintereinander, dazwischen sind Steuergitter angebracht, die nahezu Kathodenpotential besitzen. Ein derartiges Steuergitter positiv gegen die Kathode, so kann der Elektronenstrahl das Gitter passieren und den dahinterliegenden Phosphor treffen. Sobald das Potential des Steuergitters negativ gegen die Kathode ist, wird der Kathodenstrahl auf dem dem Gitter liegenden Phosphor reflektiert. In einem nach diesem Prinzip aufgebauten Zweifarbröhre trennt ein Steuergitter 2 Phosphorschirme mit komplementären Leuchtfarben. Bei der Dreifarbröhre liegen 2 Steuergitter zwischen den 3 Phosphorschirmen. Da die Farbbilder hintereinander liegen, treten bei der Betrachtung derselben schräg zur Schirmrichtung Parallaxenfehler auf.

Im Folgenden sei eine Zweifarbröhre an Hand von Abb. 16 beschrieben. Der rote Phosphor ist auf dem Metallgitter  $S_1$ , der blaugrüne auf einer Glasplatte mit einer durchsichtigen leitenden Schicht  $S_2$  aufgetragen. Beide Leuchtschirme sind in der Röhre durchverbunden und führen die volle Anoden-spannung. Zwischen den beiden Schirmen befindet sich das Steuergitter  $C$ , an das eine Wechspannung von 30 V zur Farbsteuerung angelegt wird. Im allgemeinen hat das Steuergitter keine zusätzliche Gleichvorspannung, es liegt auf Kathodenpotential. Die Wandbelegung der Röhre ist unterteilt, so daß der Kathodenstrahl durch die entstandene elektrische Linse parallel zur Röhrenachse gerichtet wird und an allen Stellen des Bildschirms nahezu senkrecht auffällt.

Die Farbe läßt sich mit dieser Röhre auch durch die Steuerung des Steuergitters  $C$  steuern, daß bei festem Potential des Steuergitters die Vorspannung der Kathode variiert wird. Da die Kapazität des Gitters wesentlich kleiner ist als die des Steuergitters, nimmt die Steuerleistung entsprechend ab. Die Potentialänderungen der Elektronenquellen um  $\pm 30$  V sind so klein im Verhältnis zu den beschleunigenden Spannungen von 9 kV, daß sie keinen Einfluß auf die Bildgröße oder die Schärfe des Bildes haben.

Abb. 17 zeigt eine ähnliche Röhre mit 2 getrennten Elektronenquellen. Das Steuergitter  $C$  hat eine feste Vorspannung, in der Regel liegt es an Erde. Die beiden Kathoden haben verschiedene Vorspannungen. Der Strahl des negativ vorgespannten Gitters kann das Steuergitter  $C$  durchdringen und den blaugrünen Phosphor anregen. Der Elektronenstrahl des zweiten Gitters, das positiv vorgespannt ist gegenüber dem Steuergitter  $C$ , wird an  $C$  reflektiert und regt deshalb den roten Phosphor an. Beide Elektronenquellen differieren in ihrer Vorspannung so wenig, daß die geschriebenen Bilder völlig gleich sind. Die Zweikathodenröhre ist sowohl für Simultan- wie für Farbwechselbetrieb brauchbar.



Farbröhren mit 3 Phosphorschirmen und 2 Steuer-  
ern zwischen den Schirmen sind grundsätzlich  
so aufgebaut wie die eben beschriebene Röhre.  
eine simultane Farbwiedergabe muß die Röhre 3  
einander unabhängige Elektronenquellen ent-  
ten, für Farbwechselverfahren genügt 1 Gun.

#### e) Leuchtschirm mit Farbzeilen.

1. Die Farbe wird durch die Bahn des Kathoden-  
ables bestimmt.

Bei allen folgenden Farbröhren ist der Leucht-  
irm in eine sehr große Zahl von regelmäßig an-  
ordneten Farblinien oder von Farbpunkten unter-  
Zunächst sei eine Röhre betrachtet (Abb. 18),  
en Leuchtschirm abwechselnd aus rot-, grün-,  
blauleuchtenden Phosphorlinien besteht, sie ist  
er Arbeit von BOND, NICOLL und MOORE [34] ent-  
ommen. Je 3 übereinanderliegende Farblinien haben  
ammen die Höhe einer Zeile des entsprechenden  
warz-Weiß-Bildes. Der Querschnitt des Katho-  
strahles am Schirm muß so klein sein, daß jeweils  
eine Farbzeile berührt wird. Um eine bestimmte  
be anzuregen, muß der Kathodenstrahl die Bild-  
he so abtasten, daß nur Linien eines der 3 Phos-  
re getroffen werden. Dies verlangt eine extrem  
aue Ablenkung längs der Zeilen, da sonst „Farb-  
sprechen“ auftritt. Damit die Zeilenablenkung  
der gewünschten Farbe verläuft, gibt man der  
ikalen Ablenkung gewöhnlich eine zusätzliche,  
ch die Lage des Elektronenstrahles ausgelöste  
uerung, etwa dadurch, daß der Strahl am Anfang  
r Ende der Zeile außerhalb der Phosphorschicht  
Kontrollstreifen fällt und dort Sekundärelektro-  
erzeugt. Diese Bahnstabilisierung bildet den  
entlichen Inhalt der genannten Arbeit von BOND,  
OLL und MOORE [34].

In vertikaler, d. h. in Bildrichtung wird der Ka-  
denstrahl bei der beschriebenen Röhre elektro-  
isch abgelenkt. Die Farbsteuerung erfolgt durch  
schiebung der Ablenkung. Bei Farbwechsel in  
ktfolge wird dem Bildsägezahn eine Treppen-  
nung überlagert (Abb. 19), so daß der Leucht-  
k beim einmaligen Überstreichen einer Zeile eine  
zahl Farbpunkte anregt.

Die Herstellung derartiger Farbzeilen wie auch  
Punktrastern kann als gelöst betrachtet werden.  
e Beschreibung der verschiedenen Techniken ent-  
die Arbeit von FREEDMANN und McLAUGHLIN [37].  
Die Aufteilung des Schirmes in ein senkrechtes  
r waagerechtes Farbstreifensystem findet sich  
völlig anderer Farbsteuerung in vielen neuen  
schlägen. Bei diesen geschieht die Entscheidung  
r die Farbe durch eine zusätzliche Bahnsteuerung  
Elektronen am Schirm selbst, nicht aber inner-  
o des magnetischen oder elektrischen Ablenkungs-  
ems. Dieses bleibt unverändert wie bei einer  
ichen Fernseh-Empfangsröhre.

2. Farbsteuerung durch Ablenkung am Schirm.  
Ein Beispiel hierfür ist in Abb. 20 skizziert. Die  
osphore sind auf Metallbänder aufgebracht. Alle  
der einer Farbe sind parallel geschaltet und nur  
e der so gebildeten 3 Gruppen wird jeweils mit  
Anodenspannung verbunden. Der Elektronen-  
hl muß unter 45° Neigung auf den Schirm auf-  
en, da das Bild von der gleichen Seite betrachtet  
1. Wenn gleichzeitig die beiden anderen Band-

systeme auf negativem Potential gegenüber dem  
dritten System sind, fällt der Kathodenstrahl nur auf  
das Band der gewünschten Farbe. Die Fokussierung  
der Elektronen auf eine bestimmte Bahn geschieht

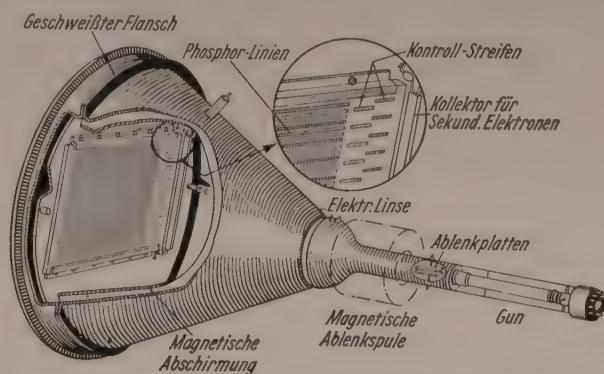


Abb. 18. Farbröhre mit horizontalen Farblinien.

durch Ablenkung derselben in unmittelbarer Nähe  
des Leuchtschirmes. Die Ablenkelektroden sind die  
Metallbänder selbst. Die notwendigen Ablenk-  
spannungen richten sich nach der Feinheit des  
Bandsystems, dürften aber bei 400—500 Farb-

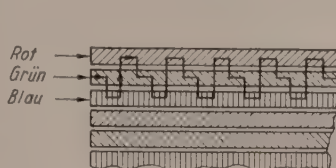


Abb. 19. Bahn des Brennflecks bei  
punktfrequentem Farbwechsel und  
horizontalen Farblinien.

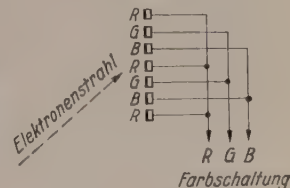


Abb. 20. Die 3 Phosphore  
liegen auf 3 elektrisch getrennten  
Streifensystemen.

tripletts und Elektronengeschwindigkeiten von 15 kV  
einige kV betragen.

Man erhält eine wesentlich wirkungsvollere Farb-  
steuerung durch Ablenkung des Kathodenstrahles in  
unmittelbarer Nähe des Schir-  
mes unter Verwendung eines  
Ablenksystems aus Metall-  
streifen oder aus Drähten,  
wie dies in Abb. 21 gezeichnet  
ist. Die Ablenkplatten oder  
Drähte liegen parallel zu den  
Farbzeilen. Auf je ein Farb-  
triplett entfällt ein Ablenk-  
plattenpaar.

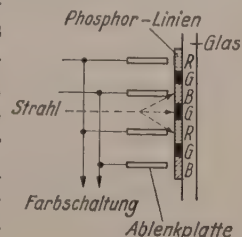


Abb. 21. Farbsteuerung  
durch Ablenkung des Ka-  
thodenstrahles unmittelbar  
vor dem Leuchtschirm.

Solange keine Spannung  
an den Ablenkplatten liegt,  
trifft der Kathodenstrahl den  
grün-emittierenden Phosphor, der die Mitte zwischen  
2 Ablenkplatten einnimmt. Eine Potentialdifferenz  
zwischen den Platten verschiebt den Strahl entweder  
nach den roten oder den blauen Farblinien, je nach der  
Richtung des angelegten Feldes. Mit Ablenkplatten  
von 1 cm Tiefe, deren Abstand 1 Bildelement beträgt  
(etwa 1 mm), werden Spannungen in der Größen-  
ordnung von 10—20 V zur Farbsteuerung benötigt.  
Die Kapazität derartiger Ablenkssysteme ist jedoch  
so groß, daß ein Farbwechsel mit höherer Frequenz  
auf erhebliche Schwierigkeiten stößt.

Eine Empfangsröhre, deren Farbsteuerung eben-  
falls durch Ablenkung der Elektronen am Schirm er-  
folgt, ist neuerdings nach Vorschlägen von O. E. LAW-



RENCE von der Chromatic Television Company entwickelt worden [38]. Da diese Farbröhre eine

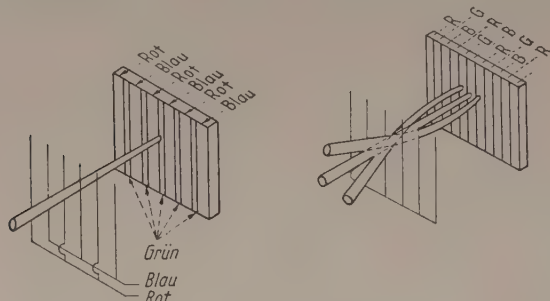


Abb. 22. Dreifarbröhre nach LAWRENCE.  
a) Farbsteuerung durch Ablenkung am Schirm.  
b) Farbsteuerung durch Richtungsänderung.

Reihe neuer Gesichtspunkte aufweist, sei sie etwas eingehender beschrieben.

### 3. Dreifarbröhre nach E. O. LAWRENCE.

Bei dieser Röhre (Abb. 22) ist der Leuchtschirm aufgeteilt in 800 vertikale Phosphorstreifen, die in

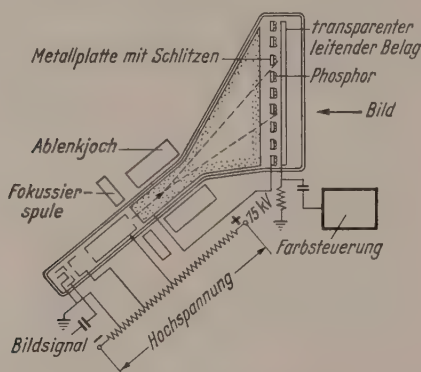


Abb. 23. Dreifarbröhre, Farbsteuerung durch Bahnänderung des reflektierten Kathodenstrahles.

den Grundfarben rot, grün und blau fluoreszieren: 400 grüne Streifen von jeweils 0,34 mm Breite liegen zwischen 200 roten und 200 blauen der doppelten Breite. Die Rückseite des Phosphorschirmes ist mit einer Aluminiumschicht versehen. Der Phosphor-

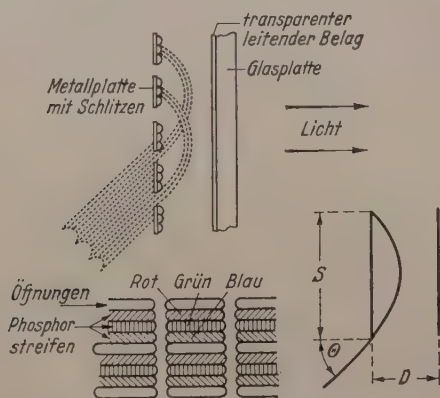


Abb. 24. Elektronenbahn vor dem Leuchtschirm bei Farbsteuerung durch Reflexion.

schirm wird von einer dünnen, planen Glasplatte getragen, zu der parallel im Abstand von 10 mm ein Gittersystem von 400 vertikalen Drähten angeordnet ist. Diese sind parallel mit den Phosphorstreifen ausgerichtet. Das Drahtgitter erfüllt 3 Funktionen: 1. die Drähte lenken den Elektronenstrahl nach links

oder rechts ab und verschieben auf diese Weise Farbe von Grün nach Rot oder Blau, 2. sie dienen als Nachbeschleunigungssystem und 3. sie wirken auf den Elektronenstrahl als Zylinderlinse und erzeugen dadurch einen elliptischen Brennfleck, kleiner als 0,12 mm ist. Hierdurch wird erreicht, dass der Strahl jeweils nur 1 Farbe anregt.

Die Drähte des Gitters haben einen Durchmesser von 0,2 mm bei einem Abstand von 1 mm. Das gesamte System der 400 Drähte hat eine Breite von 40 cm, die Bildhöhe beträgt 30 cm. Der Raum zwischen 2 Drähten bedeckt einen grünen Farbstreifen und die Hälfte des benachbarten roten und blauen Streifens. Wegen des Abstandes zwischen Drahtsystem und Leuchtschirm ist die Breite eines Farbtupfels um  $15 \mu$  größer als der Abstand zweier Drähte, so daß der Phosphorschirm im Ganzen ungefähr 6 mm breiter ist als das Drahtsystem.

Zwischen Drahtsystem und Kathode liegt eine Spannung von 3,5 kV. Nach Passieren des Drahtsystems werden die Elektronen durch eine Spannung von 10–12 kV zwischen der Aluminiumschicht und dem Drahtsystem nachbeschleunigt. Die gesamte Spannung zwischen Kathode und Leuchtschirm beträgt demnach 14–16 kV.

Die Drähte sind in 2 Gruppen unterteilt, wie Abb. 22 (links) zeigt, wobei die geradzahligen und ungeradzahligen Drähte miteinander verbunden sind. Im spannungslosen Zustand treffen die Elektronen nur auf den grünen Phosphor. Bei einer Spannung von +440 V an einer Drahtgruppe werden sie auf den roten, und für -440 V auf den blauen Phosphor abgelenkt. Die Reihenfolge der 3 Phosphore kehrt in benachbarten Ablenkfeldern um. Da sich die Elektronenrichtung in 2 benachbarten Feldern ebenfalls umkehrt, wird immer die gleiche Farbe angeregt, solange sich die Spannung an den Drähten nicht ändert.

Das Drahtsystem besitzt eine Kapazität von 1020 pF. Bei 144 Farbwechseln pro Sekunde, entsprechend den Normen der CBC, beträgt der Blindstrom 66  $\mu$ A, die Blindleistung also nur  $10^{-2}$  VA. Man nutzt man dieselbe Farbsteuerung in einem Farbwechselverfahren in Punktfolge mit der Frequenz 3,89 MHz, so wird die aufzubringende Blindleistung bereits 2,5 kVA, eine sinusförmige Wechselspannung von 440 V Scheitelwert vorausgesetzt.

Diese enorme Blindleistung wird bei einer Ausführung der Röhre mit 3 Elektronenquellen vermieden. Diese 3 Guns liegen horizontal in einer Ebene, ihre Strahlen konvergieren am Drahtsystem. Die Drähte sind alle durchverbunden und dienen lediglich als Blenden und Zwischenelektroden für die Nachbeschleunigung. Die Ablenksteuerung wird bei dieser Ausführung durch eine Richtungssteuerung ersetzt. Die Phosphorstreifen haben alle die selbe Breite und folgen in regelmäßiger Reihenfolge aufeinander (RGB, RGB...). Mit 3 Guns kann die Röhre für Simultanbetrieb oder für beliebige Wechselverfahren verwendet werden.

Die Bildauflösung mit 400 Farbtupeln und 400 Drähten genügt nach den Ergebnissen der Versuchsrohre nicht. Es ist beabsichtigt, die Anzahl der Drähte und der Farbstreifen zu verdoppeln.

### 4. Farbröhre nach WEIMER und RYNN.

In einer von WEIMER und RYNN [33] beschriebenen Farbröhre (Abb. 23) wird die Farbe gleich



der Ablenkung des Strahles unmittelbar am Schirm gesteuert. Die Elektronen fallen in der Mitte des Bildes unter einem Winkel von  $45^\circ$  auf die Rückseite des Bildschirms. Ein Ausschnitt dieses Schirmes ist in Abb. 24 wiedergegeben. Er besteht aus einer dünnen Metallplatte, in die durch einen Photoätzprozeß ein System von Schlitzblenden eingraviert ist. Die Schlitzblenden haben eine Höhe von etwa einem Drittel der Abmessung eines Bildelementes. Der durch die Schlitzblenden hindurchtretende Elektronenstrahl wird durch ein homogenes elektrisches Feld auf die Rückseite „reflektiert“. Der „Reflektor“ besteht aus einer leitenden transparenten Metallschicht auf einer planen Glasplatte, die parallel zu der Metallplatte mit Schlitzblenden angeordnet ist. Das Farbbild wird durch die Reflektorplatte hindurch betrachtet. Bei einem bestimmten Potential des Reflektors werden die Elektronen auf einen der 3 Phosphore, die in Form horizontaler Streifen auf der dem Betrachter abgewandten Seite angeordnet sind. Zwischen zwei Schlitzblenden liegt je eine Gruppe von 3 Phosphoren (R, G, B). Unabhängig von der zufälligen Lage des Elektronenstrahles innerhalb des Bildfeldes können die Elektronen nur eine bestimmte Farbe anregen. Ändert man die Spannung des Reflektors, so verschiebt sich der Auftreffpunkt der Elektronen auf eine andere Phosphorblende. Die zur Farbsteuerung benötigte Spannung ist umgekehrt proportional dem Abstand zwischen Schlitzblende, durch die der Strahl hindurchtritt, und Auftreffstelle des Strahles am Schirm. Üblicherweise liegen zwischen den beiden Stellen 30 Schlitzblenden. Unter diesen Verhältnissen genügen weniger als 100 V Spannung der Reflektorplatte, um den Strahl von 12 kV Geschwindigkeit von einer Farbe zur anderen zu verlegen. Die Kapazität zwischen der Steuerplatte und dem Phosphorschirm beträgt 50–100 pF, der Spannungswechsel kann daher bei allen Frequenzen erfolgen.

Die Farbwiedergabe ist bei dieser Röhre völlig unabhängig von dem gewählten Abtastraster. Auch bei schlecht fokussiertem Strahl kann keine „falsche“ Farbe angeregt werden. Die Ablenkung in Bild- und Tonrichtung muß wegen des schrägen Einfalles der Elektronen in bekannter Weise moduliert werden, damit ein rechteckiges Bild erhalten wird (Trapezzerrung).

Die Elektronenbewegung ist in dem homogenen Feld zwischen Phosphor- und Reflektorplatte gleich der eines Geschosses im Schwerfeld und wird nach den gleichen Beziehungen berechnet. Der Abstand  $S$  (Abb. 24) zwischen dem Punkt, an dem der Strahl durch den Schlitz hindurchtritt, und dem Punkt, in dem er auf die Schlitzplatte zurückfällt, d. i. die Schrittlänge, ist gegeben durch

$$S = \frac{2 V_B D}{V_B - V_R} \sin 2 \Theta. \quad (1)$$

Darin bedeutet  $D$  den Abstand zwischen Phosphor- und Reflektorplatte,  $V_R$  das Potential der Reflektorplatte in Volt,  $V_B$  das Potential der Metallplatte,  $\Theta$  den Einfallswinkel des Elektronenstrahles in der Ebene auf die Metallplatte. Um den Strahl von einer Farbe zur nächsten zu verschieben, interessiert die Änderung von  $S$  bei einer Änderung der Reflektorspannung. Durch Differentiation von Gleichung (1) erhält man die differentielle Verschiebung  $\Delta S$  erhalten,

die durch eine Potentialänderung  $\Delta V_R$  erzeugt wird.

$$\Delta S = \frac{2 V_B D \sin 2 \Theta}{(V_B - V_R)^2} \Delta V_R. \quad (2)$$

Der Betrieb dieser Farbbröhre wird besonders einfach, wenn die Reflektorplatte auf Erdpotential liegt. Setzt man in den Gleichungen (1) und (2)  $V_R = 0$ , so wird  $S$  bzw.  $\Delta S$

$$S = 2 D \sin 2 \Theta, \quad (3)$$

$$\Delta S = \frac{2 D}{V_B} \sin 2 \Theta \Delta V_R. \quad (4)$$

In Versuchsröhren betrug  $D = 11,2$  mm,  $S_{\max} = 22,4$  mm. In der Mitte des Bildes, wo  $\Theta = 45^\circ$  ist, haben die Farbstreifen einen Abstand von ungefähr 0,18 mm. Setzt man diese Werte in Gleichung (4) ein, so erhält man für die Spannung, die notwendig ist, um einen Elektronenstrahl von 12 kV Geschwindigkeit von einer Farbe auf die nächste abzulenken:  $\Delta V_R = 95$  V. Eine sinusförmige Spannung von 95 V Scheitelwert kann für alle Frequenzen, also für Farbwechsel in jeder gewünschten Farbfolge leicht erzeugt werden. Würde man das Potential von  $V_R$  auf 3000 V festlegen (an Stelle von 0 Volt), so würde sich die Ablenkspannung bei gleichem Aufbau der Röhre auf 50 V verringern.

Ein elektronenoptisches Problem besteht in der Forderung, daß der Elektronenstrahl auf alle Stellen des Schirmes unter  $45^\circ$  einfallen muß. Ohne Korrektur würde der Einfallswinkel der Elektronen zwischen  $30^\circ$  und  $60^\circ$  variieren. Es wurden verschiedene Wege untersucht, um der Abhängigkeit der Farbsteuerung von  $\Theta$  Rechnung zu tragen. Man kann der Metall- und Reflektorplatte eine entsprechende Krümmung geben. In einer zweiten Lösung werden planare Elektroden verwendet, und durch eine zwischen Gun und Metallplatte eingeschaltete Elektronenlinse werden die Elektronen nach der Ablenkung parallel gerichtet, so daß diese die Schlitzblenden an allen Stellen des Schirmes unter dem gleichen Winkel passieren. Schließlich kann die Änderung des Einfallswinkels in der Weise berücksichtigt werden, daß man den Abstand der Schlitzblenden, und damit die Größe und Breite der Phosphorstreifen der Variation von  $\Theta$  entsprechend ändert.

WEIMER und RYNN haben nach dem gleichen Prinzip der Farbsteuerung eine Röhre gebaut, in der 3 Elektronenquellen in einer horizontalen Ebene nebeneinander angeordnet sind. Eine derartige, auch für Simultan-Farbfernsehen geeignete Röhre arbeitet mit fester Reflektorspannung (z. B. Erdpotential). Die Farbtrennung wird dadurch erreicht, daß die Vorspannung der Kathode für das rote und blaue Gun 95 V über bzw. unter dem Potential des grünen Gun liegt. Die Elektronen jeder Farbe passieren die Schlitzblende mit etwas verschiedener Geschwindigkeit und fallen deshalb auf verschiedene Phosphore. Die 3 Elektronenstrahlen werden durch ein übliches Spulensystem gemeinsam magnetisch abgelenkt.

Ein Nachteil der beschriebenen Röhre besteht darin, daß durch die Schlitzblenden im Strahlengang drei Viertel der Elektronen weggenommen werden. Der schräge Einfall bringt weitere Verluste, so daß der Strom-Wirkungsgrad nur 15% beträgt. Trotzdem wurden an der Versuchsröhre mit einem Gun Helligkeiten erhalten, welche mit denen anderer Farbbröhren vergleichbar waren.



### f) Farbzurordnung durch die Einfallsrichtung des Kathodenstrahles.

#### 1. BAIRD — DU MONT.

In den bisher beschriebenen Farbbröhren liegen die Phosphore in einer Ebene bzw. in mehreren par-

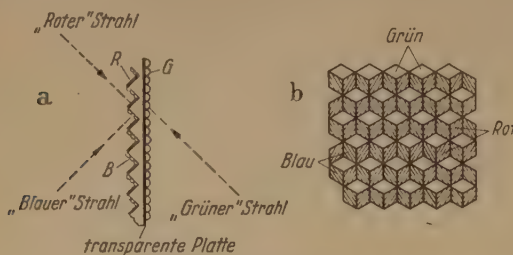


Abb. 25. a) Farbaufteilung nach BAIRD.  
b) Farbanordnung nach DU MONT.

allelen Ebenen hintereinander. Bei der nun folgenden Gruppe von Farbbröhren sind die Ebenen, auf denen

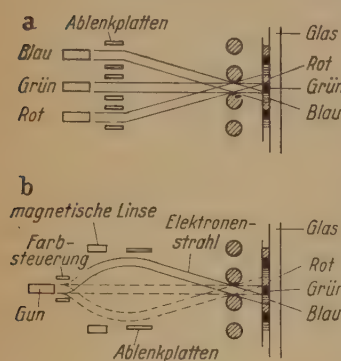


Abb. 26. Dreifarbröhre nach FLECHSIG. a) Farbsteuerung durch Richtungsänderung. b) Dreifarbröhre nach FLECHSIG, Farbsteuerung durch Vorablenkung.

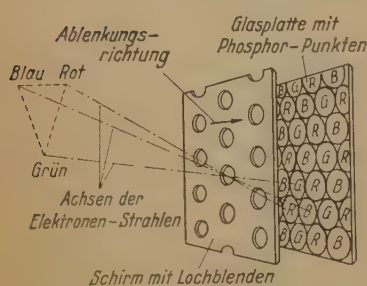


Abb. 27. Dreifarbröhre der RCA nach GOLDSMITH, Leuchtschirm und Lochschirm.

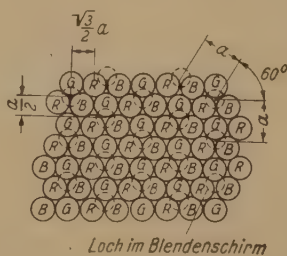


Abb. 28. RCA-Dreifarbröhre, Anordnung der Farbpunkte.

fallen auch die beiden anregenden Elektronenstrahlen aus um  $90^\circ$  verschiedener Richtung auf diese Phosphore.

Eine andere räumliche Aufteilung der 3 Phosphore, die in den DU MONT-Laboratorien entwickelt wurde [40], zeigt Abb. 25b. Die Phosphore sind auf einer Glasplatte aufgebracht, deren Oberfläche in ein System von kubischen Pyramiden unterteilt ist, so daß jede der 3 Seiten dieser Pyramide mit einem bestimmten Phosphor bedeckt ist. Die Phosphore werden von 3 gleichfalls um  $90^\circ$  räumlich versetzten Elektronenquellen angeregt. Abgesehen von der Schwierigkeit der Herstellung eines solchen Schirmes besteht das Problem, aus den 3 verschiedenen Richtungen in jedem Augenblick das Farbtripel einer dreiseitigen Pyramide zum Leuchten zu bringen.

Bild- und Zeilenablenkung aller 3 Systeme bedingt eine sehr komplizierten zweidimensionalen Trapezverzerrung, um 3 geometrisch gleiche, rechteckige Bilder aufzuzeichnen.

#### 2. FLECHSIG.

In der nun zu besprechenden Gruppe von Farbbröhren hängt die Farbe gleichfalls von der Einfallsrichtung des Elektronenstrahles ab, aber die 3 Phosphore liegen in streifen- oder punktförmiger Anordnung in einer Ebene. Zwischen den Elektronenquellen und dem Phosphorschirm liegt nahe bei dem letzteren ein Blendensystem. Dieses sorgt für die Zuordnung einer bestimmten Farbe zu einem der 3 Strahlensysteme, die mit geringen Richtungsunterschieden den genannten Blendenschirm passieren. Abb. 27 zeigt die 1938 von FLECHSIG [41] vorgeschlagene Anordnung. Ein System paralleler Drähte steht vor dem Phosphorschirm, der streifenförmig in 3 Grundfarben unterteilt ist, so daß die Strahlen gleichzeitig parallel zu den Drähten verlaufen, aus 3 verschiedenen Richtungen einfallenden Elektronenstrahlen konvergieren in der Ebene der Drähte und treffen nach dem Passieren derselben auf einem Streifen bestimmter Farbe auf. Auf diese Weise ist jedes Gun einer bestimmten Farbe zugeordnet. Unabhängig von der zufälligen Größe des Brennfleckes sorgt das Blendensystem dafür, daß der Querschnitt des Strahles so klein bleibt, daß je ein nur 1 Phosphorstreifen getroffen wird.

Von FLECHSIG wurde auch bereits eine Farbbröhre mit gleichem Blendensystem angegeben, die nur eine Elektronenquelle enthält (Abb. 26b). In diesem System wird durch eine Vorablenkung der Elektronen mittelbar hinter dem WEHNELT-Zylinder die Richtung des Strahles geändert, so daß der gleiche Strahl zeitlich nacheinander das Blendensystem aus verschiedenen Richtungen passiert.

#### 3. Die Farbbröhre der RCA nach GOLDSMITH u. SCHROEDER.

Nach einem Vorschlag von A. N. GOLDSMITH u. A. C. SCHROEDER entstand in den Laboratorien der RCA eine Dreifarbröhre, deren Farbsteuerung die der eben beschriebenen Röhre von FLECHSIG entspricht, deren verschiedenen Einfallsrichtung von 3 Elektronenstrahlen beruht, deren Blendensystem aber die Form eines Lochblendens besitzt. Die technische Ausführung dieser Röhre geht auf H. B. LAW zurück [35].

Abb. 27 zeigt grundsätzlich den Aufbau der Röhre mit Blendenschirm und des Leuchtschirmes, auf dem die 3 Phosphore punktförmig in der Weise angeordnet sind, daß je eine Gruppe von 3 Farbpunkten (R, G, B) einer Blendenöffnung zugeordnet ist. Der Blendenschirm hat etwa 200000 Löcher, der Phosphorschirm entsprechend 600000 Farbpunkte. 3 Phosphorpunkte einer Gruppe bilden ein Bildelement. Die Punktstruktur ist so fein, daß sie aus dem normalen Betrachtungsabstand vom Auge nicht mehr aufgelöst wird. Werden also gleichzeitig durch die 3 Strahlensysteme alle Punkte einer Gruppe zum Leuchten angeregt, so erscheint das betreffende Bildelement als Weiß.

Abb. 28 zeigt die geometrische Anordnung der Farbpunkte. Die Mittelpunkte eines Farbtripels bilden die Ecken eines gleichseitigen Dreiecks. Die Größe und die Lage der zu einem Tripel



renden Lochblende ist in der Abbildung durch punktierten Kreise angegeben. Die perforierte Metallplatte hat zusätzlich die Aufgabe, die 3 Elektronenströme unabhängig von der Schärfe und Größe des Brennflecks so weit abzudecken, daß von jedem Punkt nur 1 Farbpunkt angeregt werden kann. Die Blendenscheibe wirkt als Maske. Sie sorgt außerdem dafür, daß bei der Ablenkung der Elektronenstrahlen kein Bild- und Zeilenrichtung jeweils nur 1 Farbtupel gegeben wird und verhindert, daß in den Zwischenräumen ein Strahl eine ihm nicht zugeordnete Farbe abgeben kann. Der Abstand zwischen Blendenscheibe und Phosphorschirm beträgt etwa 12 mm.

Die 3 Elektronenquellen sind dicht nebeneinander angeordnet (Abb. 29). Ihre Achsen liegen nahezu parallel und parallel zur Röhrenachse. Die Schnittpunkte der 3 Gunachsen mit einer auf der Röhrenachse senkrechten Fläche bilden ein gleichseitiges Dreieck. In einer ersten Ausführung dieser Dreifarbröhre konvergieren die 3 Strahlrichtungen unter einem Winkel von etwa  $2^\circ$  so, daß sich die 3 Strahlen am Blendschirm schneiden. In der letzten Ausführung sind die 3 Strahlrichtungen parallel zueinander und zur Rohrachse angeordnet, und durch eine zusätzliche elektrostatische Linse kann die Konvergenz der Strahlen auf den richtigen Betrag eingestellt werden. Bei einem Konvergenzwinkel von  $2^\circ$  können die 3 Elektronenquellen im Hals einer Kathodenstrahlröhre von etwa 50 mm Durchmesser untergebracht werden. Die 3 Strahlen werden durch ein Ablenkensystem gemeinsam in Bild- und Zeilenrichtung magnetisch abgelenkt. Die Fokussierung der Guns erfolgt elektrostatisch. Damit aber die 3 Elektronenstrahlen an jeder Stelle der Blendenscheibe konvergieren, muß der Fokus gemeinsam mit der Ablenkung der drei Strahlen dynamisch nachgeregelt werden.

Der Blendschirm wird durch einen Ätzprozeß hergestellt. Eingehende technische Angaben über den verwendeten Herstellungsprozeß finden sich in der Arbeit von BARNES und FAULKNER [42]. Die Herstellung des in Phosphorpunkte unterteilten Leuchtschirmes wurde in der bereits zitierten Arbeit von FREEDMANN und McLAUGHLIN [37] beschrieben. Es geschieht in der Weise, daß für jeden Blendschirm eine Druckschablone mit ebenfalls 10000 Punkten hergestellt wird. Diese darf keine Kontaktkopie der Blendenscheibe sein; da die Elektronenstrahlen in der Bildmitte und an den Bildrändern unter verschiedenem Winkel auf die Blendenscheibe fallen, muß der Abstand der Farbtupel in der Mitte und am Rand verschieden sein. Die Druckschablone wird daher so erzeugt, daß man den mit einer lichtempfindlichen Schicht (etwa Chromgelatine) überzogenen Druckstock in gleichem Abstand und gleicher Lage hinter der Blendenscheibe anordnet, die bei der fertigen Röhre der Leuchtschirm einnimmt. Durch eine punktförmige Lichtquelle an der Stelle eines Guns wird die Druckschablone durch die Blendenscheibe hindurch belichtet. Der Abstand zwischen Blendenscheibe und Druckstock ist durch einen Metallrahmen festgelegt, welcher die richtige Lage des Leuchtschirmes bei der späteren Montage des Leuchtschirmes in der Röhre garantiert. Von diesem einen Druckstock werden die Punktraster der Phosphore nacheinander gedruckt. Durch Ver-

schieben der Schablone um den Abstand eines Bildpunktes wird erreicht, daß die 3 Farbraster regelmäßig nebeneinander zu liegen kommen.

Mit den Toleranzen im Bau des Lochschirmes befaßt sich die Arbeit von ORMER und BALLARD [44], mit dem konstruktiven Aufbau der 3 Elektronenquellen die von MOODY und ORMER [45].

Diese Dreifarbröhre mit 3 getrennten Elektronenquellen ermöglicht sowohl eine simultane Farbüber-

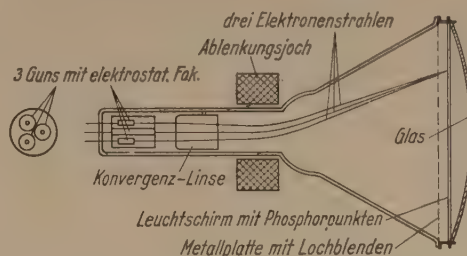


Abb. 29. Dreifarbröhre der RCA mit 3 Guns.

tragung wie auch ein Farbwechselverfahren in beliebiger Folge. Die farbrichtige Wiedergabe hängt ausschließlich von der präzisen Herstellung der Röhre ab. Fehler in der Fokussierung des Elektronenstrahles erzeugen lediglich ein unscharfes Bild, aber keine Verfälschung der Farbe. Die Röhre kann für jede Zeilennorm verwendet werden, ihre Auflösungsgrenze ist durch die Zahl der Farbtupel gegeben.

Von R. R. LAW [36] wurde auch eine Dreifarbröhre mit gleicher Konstruktion von Blendenscheibe und Phosphorschirm entwickelt, die an Stelle der drei Guns nur eine Elektronenquelle vorsieht, welche nacheinander die 3 Farben eines Tripels anregt. Diese Röhre mit einem Gun steuert die Farbe durch eine Vorablenkung, wie dies grundsätzlich bei der Röhre von FLECHSIG angegeben wurde (Abb. 26b).

Die bisher hergestellten Dreifarbröhren mit Punktraster hatten eine Bildgröße von  $22 \times 30$  cm. Die Anodenspannung betrug 12–15 kV, die erreichten Helligkeiten etwa 200 Lux.

In der Dreifarbröhre der RCA werden z. Zt. folgende Phosphore verwendet: für

Grün: Willemit ( $\text{Zn}_2\text{SiO}_4$  : Mn)

Blau: Zinksulfid ( $\text{ZnS}$  : Ag)

Rot: Zinkphosphat [ $\text{Zn}_3(\text{PO}_4)_2$  : Mn].

Im Farbdreieck (Abb. 30) sind die Farben dieser drei Phosphore durch kleine Quadrate eingezeichnet.

Wie bereits früher gesagt wurde, besitzen die drei Elektronenstrahlen einer Dreifarbröhre ein gemeinsames Ablenkensystem. Von der üblichen Empfangsröhre für schwarz-weiße Bilder her ist bekannt, daß das Ablenkensystem die Schärfe des Brennflecks erheblich beeinflußt. In einer Arbeit von FRIEND [43] wurden die günstigsten Formen von Ablenkspulen für Farbröhren mit einem und mit 3 Guns diskutiert.

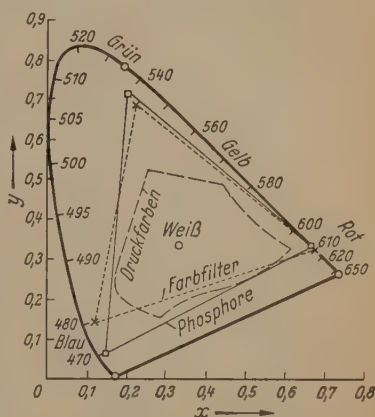


Abb. 30. Farbdreieck nach J.C.J.



### G. Farbenfernseh-Systeme.

Im folgenden seien einige Farbfernseh-Systeme im Zusammenhang betrachtet, deren Entwicklung einen gewissen Abschluß erreicht hat.

a) *Das Farbfernseh-Verfahren der CBC* (Farbwechsel in Rasterfrequenz).

Wie bereits bei der Besprechung der grundsätzlichen Möglichkeiten gesagt wurde, arbeitet die CBC mit Farbwechsel am Beginn jedes Rasters. Der rasterfrequente Farbwechsel ermöglicht die Verwendung mechanisch bewegter Farbfilter auf der Aufnahme- und gegebenenfalls auch auf der Wiedergabe-seite, und dadurch die Aufnahme und Wiedergabe mit einer Aufnahme- bzw. einer Wiedergaberöhre wie in der Schwarz-Weiß-Fernsehtechnik. Alle Schwierigkeiten, die den Simultan-Systemen und den Farbwechsel-Verfahren mit Farbwechsel in Zeilen- oder Punktfolge durch die Verwendung dreier Aufnahme- und dreier Wiedergaberöhren anhaften, sind somit beim rasterfrequenten Farbwechsel vermieden. Auf der Empfangsseite kann die mechanisch bewegte Filterscheibe durch jede Dreifarbröhre ersetzt werden.

Über die bei der CBC geleistete Entwicklung unterrichten die Veröffentlichungen von P. GOLDMARK und seiner Mitarbeiter: DYER, HOLLYWOOD, PIORE, CHRISTENSEN und REEVES [46—50]. In der folgenden Tabelle sind Zeilenzahl, Rasterzahl pro Sekunde und die Bandbreite aufgeführt für den Stand der Entwicklung in den Jahren 1940, 1945 und 1949. Entscheidend für die Bildaufteilung in den 3 Zeitabschnitten war die jeweils als zulässig betrachtete Bandbreite.

| Jahr | Zeilenzahl<br>pro Bild | Zeilenzahl<br>pro Raster | Raster<br>pro sec | Farbbilder<br>pro sec | Band-<br>breite |
|------|------------------------|--------------------------|-------------------|-----------------------|-----------------|
| 1940 | 343                    | 171,5                    | 120               | 20                    | 4,5             |
| 1945 | 525                    | 262,5                    | 144               | 24                    | 12,5            |
| 1949 | 405                    | 202,5                    | 144               | 24                    | 4,5             |

Bei den ersten Farbübertragungen der CBC im Jahr 1940 betrug die Zahl der Raster 120 in der Sekunde. In Abb. 3 wurde bereits gezeigt, wie die 3 Grundfarben auf die aufeinanderfolgenden Raster verteilt sind. Da erst eine Gruppe von 6 aufeinander folgenden Rastern ein Bild vollständig in allen Farben wiedergibt, wurden mit 120 Rastern 20 Farbbilder pro Sekunde übertragen. Bereits diese ersten Farbdemonstrationen waren außerordentlich eindrucksvoll und ihr unbestrittener Erfolg leitete die Entwicklung an zahlreichen anderen Stellen ein. Um die Bandbreite für die Farbübertragung gegen das Schwarz-Weiß-Fernsehen nicht zu ändern, hatte man die Zeilenzahl von 525 auf 343 herabgesetzt.

Die Rasterzahl von 120 pro Sekunde erwies sich mit wachsenden Anforderungen an die Bildhelligkeit als zu niedrig. Außerdem bedeutete der Rückgang auf die kleine Zeilenzahl eine wesentliche Verschlechterung in der Auflösung, die nur z. T. durch die Farbe wettgemacht wurde. Im Jahr 1945 wurden deshalb von der CBC Farbbilder mit 525 Zeilen je Bild vorgeführt und die Rasterzahl auf 144 erhöht. Durch beide Maßnahmen stieg die Bandbreite auf 12 MHz.

Im Jahr 1945 erschien eine Bandbreite von mehr als 10 MHz für ein Farbfernseh-System als notwendig und tragbar, da beabsichtigt war, die Fernseh-Sender

in dem Frequenzgebiet von 480—920 MHz unterbringen. Da aber in den folgenden Jahren dieses Frequenzgebiet vom Schwarz-Weiß-Fernsehen beansprucht wurde, sah sich das Federal Communications Committee gezwungen, die Bandbreite für ein Farbsystem auf 6,0 MHz zu beschränken.

Im Jahr 1950 billigte das *Federal Communications Committee* folgende von der CBC vorgeschlagene Normen: Farbwechsel in Rasterfolge, Rasterzahl 144 pro Sekunde, Bandbreite 6,0 MHz, davon 4,5 MHz für das Bildsignal, 405 Zeilen pro Bild, Zeilensprung 2.

Beim Schwarz-Weiß-Fernsehen genügen 50 bis 60 Rasterwechsel pro Sekunde für ein flimmerfreies Bild bis zu sehr hohen Schirmhelligkeiten, weil aufeinander folgende Raster eines Schwarz-Weiß-Bildes praktisch immer gleiche Helligkeit haben. Würde man ein Bild konstruieren, in dem die einzelnen Raster merklich verschiedene Helligkeit haben (z. B. eine Zeichnung, in der alle ungeradzahlgigen Zeilen  $\frac{1}{5}$  der Helligkeit der geradzahlgigen Zeilen aufweisen), so müßte die Rasterfrequenz auf mehr als 100 pro Sekunde erhöht werden, um bei gleicher mittlerer Helligkeit das Flimmern zu beseitigen.

Bei einem Farbwechsel-Verfahren in Rasterfrequenz haben 3 aufeinander folgende Farbauszüge immer verschiedene Helligkeit, auch dann, wenn ihre Summe „Weiß“ ergibt. Die Helligkeitswerte der 3 Grundfarben stehen im günstigsten Fall für Rot zu Grün zu Blau im Verhältnis 5 : 10 : 2. Herrscht in einem Farbbild eine bestimmte Farbe vor, z. B. grün, so kann der Anteil der beiden anderen Farben sehr klein sein; das Helligkeitsverhältnis der 3 aufeinander folgenden Farbauszüge kann beliebige Unterschiede aufweisen. Dies ist der Grund, warum ein rasterfrequenter Farbwechsel zu einer Verdreifachung der Rasterfrequenz führt.

Bei 144 Rastern pro Sekunde und den nachstehend definierten Grundfarben liegt die obere Grenze der Bildhelligkeit bei etwa 240 Lux. Sie ist also wesentlich tiefer als beim monochromen Fernsehen, das mit nur 60 Rastern pro Sekunde Schirmhelligkeiten von etwa 1000 Lux zuläßt.

Soll die gesamte Bandbreite bei einer Übertragung von 144 Teilbildern in der Sekunde nicht größer sein als bei 60 Rastern, so muß die Bildauflösung im Verhältnis 1 : 2,5, die Zeilenzahl bei gleicher Auflösung in horizontaler und vertikaler Richtung im Verhältnis 1 :  $\sqrt{2,5}$  herabgesetzt werden. Tatsächlich wurde die Zeilenzahl von 525 auf 405 reduziert. Demzufolge beträgt die Auflösung in der Zeilenrichtung bei einer Bandbreite von 4,5 MHz und 72 Bildern pro Sekunde (144 Rastern) nur etwa 240 Bildelemente. Die CBC glaubte, eine derartig geringe horizontale Auflösung in Kauf nehmen zu können, da eine von GOLDMARK und HOLLYWOOD [50] entwickelte Technik (crisping) eine nachträgliche Versteilung aller Helligkeitsänderungen in der Zeilenrichtung ermöglicht. Im Versuch, die Horizontalauflösung durch Einführen des Punktsprunges zu verbessern, scheint dagegen keinem befriedigenden Ergebnis geführt zu haben.

Der Farbbempfinger der CBC verwendete folgende 3 Grundfarben:

| Rot         | Blau        | Grün        |
|-------------|-------------|-------------|
| $x = 0,674$ | $x = 0,122$ | $x = 0,227$ |
| $y = 0,326$ | $y = 0,142$ | $y = 0,694$ |



dem Farbdreieck der Abb. 30 sind diese 3 Primär-  
farben mit Kreuzen markiert und der mit ihnen er-  
reichte Farbbereich als gestrichelte Linien eingezeichnet.  
Der Leuchtschirm der Empfangsröhre besteht aus  
einer Mischung von 3 Phosphoren, deren Lumines-  
zenz sich jeweils mit einer der obigen Primärfarben  
deckt. Die Phosphore müssen anteilig so gemischt  
sein, daß für gleiche Steuerspannung am WEHNELT-  
röhre für *R*, *G* und *B*, also für gleiche Elektronen-  
ströme, Weiß entsteht.

Da die Farbaufteilung des „weißen“ Leuchtschir-  
ms erst durch die vor dem Schirm rotierenden Filter  
erfolgt, bestimmt deren spektrale Durchlässigkeit  
zusammen mit der spektralen Verteilung der Lumi-  
nenz die Empfänger-Grundfarben. Abb. 31 zeigt  
die Durchlässigkeit von 3 auf der Wiedergabeseite  
verwendeten Farbfiltern. Wegen des geringen Wir-  
kungsgrades der bisher verwendeten Rot-Phosphore  
trägt die Durchlässigkeit des grünen und blauen  
Filters nur etwa 35%. Die Lichtverluste sind also  
erheblich.

Sind die Primärfarben für den Empfänger fest-  
gelegt, so ergeben sich daraus zwangsweise die spek-  
tralen Empfindlichkeiten für die Sendeseite. Die  
spektrale Empfindlichkeit eines Farbsenders sollte  
in Abb. 32 gezeigten Verlauf haben. Wie vom  
Farbdruck her bekannt ist, verlangt die farb-  
tätige Reproduktion spektrale Charakteristiken für  
die Aufnahmeseite, die z. T. im Negativen verlaufen,  
d. h. (Rot der Abb. 32) 2 Maxima besitzen. Der nega-  
tive Teil der Kennlinien läßt sich beim Druckver-  
fahren durch Abdecken in grober Näherung berück-  
sichtigen. Exakt kann bei Simultan-Fernsehver-  
fahren die Verstärkung in den 3 Grundfarben so ge-  
steuert werden, daß die Empfindlichkeit den von der  
Theorie geforderten Verlauf hat. Negative Kurven-  
teile bedeuten eine Herabsetzung eines Farbsignales.  
Die Funktion der Amplitude eines zweiten Farbsig-  
nals. Bei Farbwechsel-Verfahren sieht man ge-  
wöhnlich von dieser Korrektur ab.

Unter Vernachlässigung von negativen Kurven-  
teilen führen die oben genannten 3 Grundfarben zu  
den in Abb. 33 gezeigten Kennlinien für die Abtast-  
seite. Die Signalspannung einer Farbaufnahme als  
Funktion der optischen Wellenlänge wird bestimmt  
durch die spektrale Energieverteilung der Studio-  
beleuchtung *E*, die spektrale Empfindlichkeit der  
Aufnahmekamera *S*, die spektrale Durchlässigkeit  
der 3 Aufnahmefilter (*R*, *G*, *B*) und die relativen Ver-  
stärkungswerte *r*, *g*, *b* der 3 Farbsignale. Die Größen  
*r* und *S* und *R* sind wie folgt definiert:

a) Die spektrale Energieverteilung *E* sei gleich  
dem Strahlungsfluß der Lichtquelle pro Einheit der  
Wellenlänge im sichtbaren Gebiet des Spektrums  
(400—700 mμ).

b) *S* sei die spektrale Empfindlichkeit der Auf-  
nahmeröhre, gemessen durch das abgegebene Signal  
pro Einheit des Strahlungsflusses von spektral homo-  
gener Energie als Funktion der Wellenlänge.

c) *R*, *G*, *B* seien die spektralen Durchlässigkeiten  
des roten, grünen und blauen Farbfiltern, definiert  
als Verhältnis des durchgelassenen zu dem einfallenden  
Strahlungsfluß von spektral homogener Energie  
als Funktion der Wellenlänge.

Die Energieverteilung der Lichtquelle, die Ka-  
mera-Empfindlichkeit und die Durchlässigkeit der

3 Farbfilter soll folgende Bedingungen erfüllen:

$$\begin{aligned} 1. & \int_{550}^{660} ESRd\lambda / \int_{400}^{700} ESRd\lambda \geq 0,9; \\ 2. & \int_{490}^{600} ESGd\lambda / \int_{400}^{700} ESGd\lambda \geq 0,9; \\ 3. & \int_{410}^{500} ESBd\lambda / \int_{400}^{700} ESBd\lambda \geq 0,9. \end{aligned}$$

4. Beim Belichten einer weißen Fläche mit einer  
Lichtquelle der Energieverteilung *E* sollen die drei  
Farbsignale am Sender innerhalb 5% gleich sein.  
Dieser Abgleich bei ge-  
gebenen Werten von *E*,  
*S* und *R* bzw. *G* und *B*  
setzt eine getrennte Ver-  
stärkung für die 3 Farbsig-  
nale voraus. Die Ver-  
stärker, deren Eingangs-  
spannungen von der für  
alle Farben gemein-  
samen Aufnahmeröhre  
geliefert wird, werden  
synchron mit dem Farb-  
wechsel aufgetastet.

Die gegen das Farb-  
verfahren der CBC er-  
hobenen Einwände be-  
treffen in erster Linie  
die mechanischen Hilfs-  
mittel für den Farb-  
wechsel, also die rotierende Filterscheibe oder Filter-  
trommel im Farbeempfänger, deren Platzbedarf, Ge-  
räusch, Geschwindigkeit usw. Diese Einwände ent-  
fallen bei Verwendung  
einer Fernseh-Projek-  
tionsröhre oder einer  
Dreifarbentöhre.

Wichtiger als die  
Bedenken gegen den  
mechanischen Farb-  
wechsel am Empfänger  
ist die Tatsache, daß  
das Farbsystem der  
*Columbia* andere Nor-  
men für Raster- und  
Zeilenwechsel verwen-  
det als das bisherige  
Schwarz - Weiß - Fern-  
sehen. Es ist nicht  
möglich, mit einem heutigen Fernseh-Empfänger  
den Helligkeitsanteil einer Farbsendung nach den  
Normen der CBC als Schwarz-Weiß-Bild aufzuneh-  
men. Der Ablenkteil  
eines Fernseh-Empfän-  
gers muß auf beide  
Normen umstellbar  
sein.

Umgekehrt kann ein  
vorhandener Fernseh-  
Apparat nach Änderung  
der Ablenkung zum  
Farbeempfang der *Co-  
lumbia-Norm* durch Vor-  
satz einer Filterscheibe  
umgebaut werden.

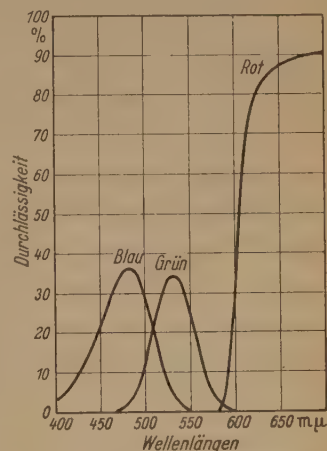


Abb. 31. Spektrale Durchlässigkeit der Empfangsfilter der CBC.

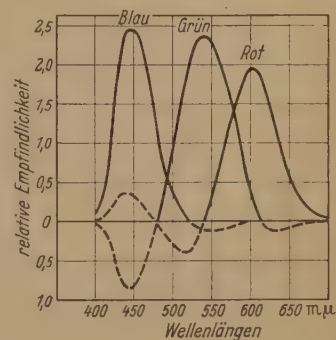


Abb. 32. Ideales spektrale Empfindlichkeit eines Farbabtasters.

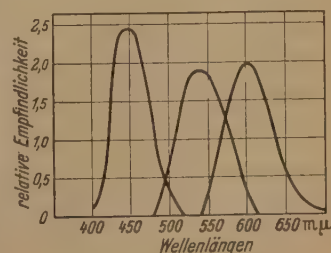


Abb. 33. Die von der CBC am Farbsender verwendete spektrale Empfindlichkeit.



b) Das Verfahren der Color Television Inc. (Farbwechsel in Zeilenfolge.)

Bei diesem Verfahren wechseln die 3 Primärfarben nach jeder abgetasteten Zeile. Gegenüber dem Farbwechsel in Rasterfolge erhoffte man eine wesentliche Herabsetzung des Farbflimmerns. Gleichzeitig sollte die Raster- und Zeilenfrequenz und die Bandbreite unverändert wie im Schwarz-Weiß-Standard bleiben.

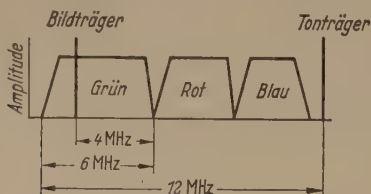


Abb. 34. 3 simultane Farbsignale nebeneinander in einem hochfrequenten Kanal.

Im Gegensatz zu dem in Abb. 4 gezeigten Farbwechsel sollte die Abtastung in folgender Farbfolge vor sich gehen: im ersten Raster die ungeradzahigen Zeilen in der Reihenfolge grün, blau, rot; im zweiten Raster dieselben ungeradzahigen Zeilen in der Reihenfolge rot, grün, blau und im dritten Raster schließlich die gleichen ungeradzahigen Zeilen in der Farbfolge blau, rot, grün. Auf diese Weise sind nach 3 Rastern alle ungeradzahigen Zeilen eines Bildes in den drei Grundfarben abgetastet. Ähnlich sollen im 4., 5. und 6. Raster alle geradzahigen Zeilen in den 3 Grundfarben übermittelt werden.

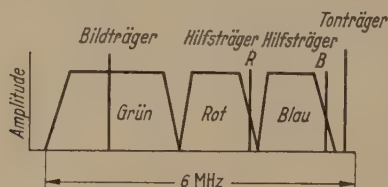


Abb. 35. Simultan-System mit 2 Hilfsträgern ohne Frequenz-Überlappung.

Der gesamte Abtastprozeß umfaßt somit 6 Raster; in  $6 \cdot \frac{1}{60} = 1/10$  sec wird ein vollständiges Farbbild übertragen. In diesem Verfahren ist der übliche Zeilensprung nicht beibehalten in der Hoffnung, bei unmittelbar aneinander anschließender Abtastung einer bestimmten Linie in den 3 Grundfarben das Zwischenzeilen-Farbflimmern zu verringern. Dies ist aber auch durch das geänderte Abtastschema nicht gelungen. Alle vorgeführten Bilder litten unter einem unerträglichen Zwischenzeilenflimmern. Der Grund liegt, wie früher ausgeführt wurde, in der verschiedenen Helligkeit aufeinanderfolgender Farben.

Da dieses System heute keine Bedeutung mehr besitzt — die Versuche wurden 1950 eingestellt —, soll der technische Teil nur kurz skizziert werden. Auf der Aufnahmeseite wurde ein Image-Orthicon verwendet, auf dessen lichtempfindlicher Schicht die 3 Teilbilder über dichroitische Spiegel nebeneinander entworfen wurden. Der Abtaststrahl des Orthicons überstreicht bei einmaliger Ablenkung eine Zeile des roten, grünen und blauen Teilbildes. In der Ausgangsspannung der Aufnahmeröhre sind die Farbsignale dreier Bildzeilen in der beschriebenen Reihenfolge enthalten. Da bei der einmaligen Ablenkung

des Image-Orthicons bereits 3 Zeilen geschrieben wurden, mußte die Zeilenablenkfrequenz auf  $1/3$  15750, also auf 5250 pro Sekunde herabgesetzt werden. Analog waren am Empfänger in einer Röhre 3 Phosphore nebeneinander angeordnet, wie die Abb. 13c dargestellt ist. Bei der Wiedergabe einer derartigen Röhre war die Zeilenfrequenz ebenfalls 5250 Hz. Der Empfänger mußte, wenn gleichzeitig Schwarz-Weiß-Sendungen aufgenommen sollte, umschaltbar sein auf die Frequenz 15750

c) Die Verfahren der RCA.

1. Simultan-Verfahren.

Zwei Tendenzen charakterisieren die Entwicklung der Farbfernseh-Verfahren der RCA: erstens die Vermeidung aller mechanisch bewegten Teile und zweitens der Grundsatz, daß die vorhandenen Schwarz-Weiß-Empfänger ohne Änderung imstande sein müssen, aus einer Farbsendung ein vollwertiges Schwarz-Weiß-Bild zu empfangen. Das in den Jahren 1940 entstandene Farbverfahren war voll simultan. Es ist in den Veröffentlichungen von KELL [19] und in den Richtlinien der RCA [51] beschrieben. Über frühe Farbfernseh-Versuche der RCA mit Farbwechsel-Rasterfrequenz siehe KELL und Mitarbeiter [52].

Auf der Aufnahmeseite des Simultan-Verfahrens waren 3 getrennte Kameras vorgesehen, auf der Wiedergabeseite 3 Bildröhren, wie dies eingangs der Beschreibung eines Simultan-Verfahrens geschildert wurde. (Abb. 1). An Stelle dreier Übertragungskanäle sollten die Bildsignale der 3 Farben auf einer hochfrequenten Trägerwelle ausgestrahlt werden. Die Trägerschwingung wurde durch den Inhalt des grünen Teilbildes direkt in ihrer Amplitude moduliert, die Videosignale der blauen und roten Teilbilder wurden in das Frequenzgebiet von 4–8 bzw. 8–12 MHz verschoben und dann dem Sender aufmoduliert. Jedes der 3 Teilbilder hatte dieselbe Auflösung wie das bisherige Schwarz-Weiß-Bild, also 525 Zeilen und 60 Raster, Zeilensprung 2 : 1. Die notwendige Bandbreite für den Bildteil betrug demnach 12 MHz. Die Lage der 3 Farbsignale im Sendekanal wird durch Abb. 34 wiedergegeben. — An Stelle der Frequenztransponierung für die roten und blauen Videosignale können diese auch 2 Hilfsträger modulieren, die ihrerseits zusammen mit dem grünen Videosignal den Hauptträger modulieren, wie dies in Abb. 35 dargestellt ist.

Zur Verringerung der gesamten Bandbreite schloß man sich sehr bald mit Rücksicht auf das geringere Auflösungsvermögen des Auges für blaues und rotes Licht, die Bandbreite für diese beiden Farben zu reduzieren. Tatsächlich konnte die Bandbreite für den blauen Farbauszug auf ein Drittel herabgesetzt werden, ohne daß dadurch die Farbwiedergabe merklich schlechter geworden wäre.

Da die Hauptträgerschwingung durch den grünen Farbauszug mit gleicher Bandbreite und gleicher Helligkeit zerlegt wurde wie im Schwarz-Weiß-Fernsehen direkt amplitudenmoduliert war, konnte jeder Empfänger durch Aufnahme des grünen Teilbildes ein Schwarz-Weiß-Bild wiedergeben. Die Farbsendung ließ sich aber trotz der Beschränkung des roten und blauen Bandes auf je 1,3 MHz Breite nicht in die 6 MHz Gesamtbreite des USA-Standards zusammenpressen, deshalb wurde das Simultan-Verfahren verlassen.



Arbeit in den folgenden Jahren ausschließlich auf Verfahren mit Farbwechsel in Punktfolge konzentriert. In der Tat konnte die RCA bereits im Jahre 1949 mit einer Kanalbreite von 6 MHz eine Farbübertragung demonstrieren, deren Abtastnormen mit denen des Schwarz-Weiß-Fernsehens identisch waren.

## 2. Farbwechsel in Punktfolge.

Die Entwicklung und Wirkungsweise des neuen Überverfahrens der RCA 1949/50 ist in den Laborberichten [53, 54] enthalten. Sie soll an Hand der schematischen Darstellung des Senders und des Empfängers in Abb. 36 und 37 beschrieben werden. Am Anfang nehmen in einer gemeinsamen Kamera 3 getrennte Image-Orthicon über farbselektive Spiegel 3 Teilbilder in gleicher Größe auf (Abb. 36). Jedes Orthicon ist über ein Tiefpaßfilter von 0—2 MHz mit einem der 3 Kontakte eines Umschalters verbunden. Dieser Farbschalter ermittelt periodisch Momentanwerte der Ausgangsspannungen der Farbkanäle. Er besteht aus 3 Elektronenröhren, abwechselnd mit der Frequenz 3,6 MHz aufgetastet werden. Der Farbschalter wird von einem Generator synchronisiert, dessen Frequenz zusammen mit dem Zeilensynchronisier-Impuls übertragen wird. Dem man diese Zeilensynchronisier-Impulse abwechselnd etwas kürzer oder länger dauern läßt, wird der Abtastzeitpunkt für eine bestimmte Farbe eines beliebigen Zeilen zwischen die Abtastpunkte derselben Farbe in der darauffolgenden Zeile gelegt.

Für die Abtastung einer bestimmten Farbe steht ein Drittel einer Schaltperiode, d. i.  $0,092 \mu\text{sec}$  zur Verfügung. Nach jeweils  $120^\circ$  Umdrehung des Schalters wird die folgende Farbe abgefragt. Die Dauer einer Abtastung beträgt nur  $\frac{1}{6}$  einer Periode, es entstehen deshalb durch den Abtastvorgang rechteckige, dreifache Impulse, die in einem Tiefpaßfilter zu einer Gleichstromkomponente und einer Sinusschwingung der Frequenz 3,6 MHz umgeformt werden. Aus jeder Farbe entsteht also zunächst eine Sinusschwingung, deren Amplitude von der Größe des Farbanteiles des gerade abgetasteten bunten Bildelementes bestimmt wird. Die 3 um  $120^\circ$  gegeneinander verschobenen sinusförmigen Spannungen der 3 Grundfarben werden zu einer resultierenden Sinusspannung der Frequenz 3,6 MHz addiert, ebenso deren Gleichstromkomponenten. Die so erzeugte Schwingung von 3,6 MHz und deren Seitenbänder modulieren die Amplitude der Trägerschwingung. Da zwischen jeder Aufnahme- und den Abfrageschalter ein Tiefpaß von 0—2 MHz eingeschaltet war, enthält dieses Farbsignal nur die Farbwerte über Flächenelemente, die etwas größer sind als 2 Bildelemente. Die 3 zugehörigen bunten Bildelemente gehörenden Farbanteile werden demnach zeitlich unmittelbar aneinander anschließend über einen hochfrequenten Sender übertragen.

Aus den Ausgangsspannungen der 3 Aufnahme-kameras wird in der Addierstufe I ein Signal gebildet, das nur die Frequenzen von 2—4 MHz enthält (mixed highs). Dieses in der Hauptsache die Bildschärfe charakterisierende Signal moduliert zusammen mit dem zuvor beschriebenen Farbsignal von 3,6 MHz den hochfrequenten Sender. Ein normaler Schwarz-Weiß-Empfänger kann aus dieser Sendung ohne An-

derung seiner Normen ein Schwarz-Weiß-Bild der vollen Bildauflösung aufnehmen.

Für die Wiedergabe der Farbe benötigt der Empfänger die in Abb. 37 gezeigten Teile. Der Farbfernseh-Empfänger ist bis zum Bildgleichrichter identisch mit einem Schwarz-Weiß-Empfänger. An den Gleichrichter schließt sich ein Synchron-Umschalter an, der

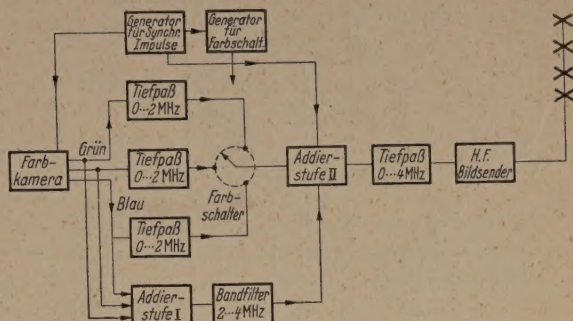


Abb. 36. Schema eines RCA-Farbsenders mit punktfrequenter Farbwechsel und „mixed highs“.

die vom Gleichrichter gelieferten Momentanwerte der Amplitude auf 3 getrennte Farbröhren oder auf die 3 Guns einer Dreifarbröhre verteilt. Die Synchronisierung des Farbschalters erfolgt durch die Übertragung einer Gruppe von 9 Schwingungen der Schaltfrequenz, die auf der Rückflanke des modifizierten Zeilenimpulses liegen. In Veröffentlichungen von GEORGE [55] und DOME [56] wurden verschiedene Möglichkeiten zur Synchronisierung des Empfangsverteilers ausführlich diskutiert.

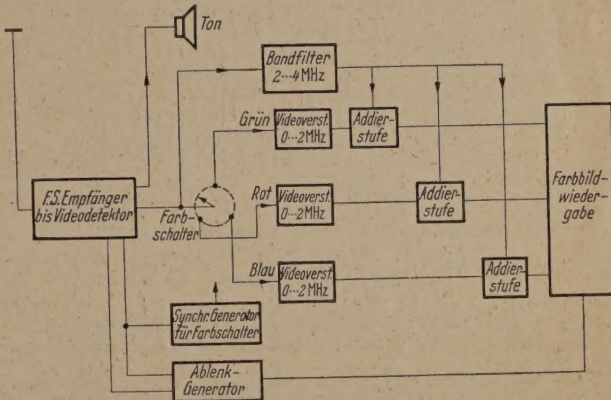


Abb. 37. Schema eines RCA-Farbempfängers.

Da die Farbschalter am Sender und am Empfänger in Phase rotieren, wird eine bestimmte Aufnahme-röhre, z. B. die rote, immer mit dem roten Gun der Empfangsröhre verbunden, grün mit grün usw. Das rote Gun schreibt also ein vollständiges Rotbild innerhalb einer Abtastung des Bildfeldes, ebenso die anderen Guns. In der Dreifarbröhre liegen die drei Farbbilder so ineinander, daß das Auge an jeder Stelle nur die Summe der 3 Grundfarben erfaßt, und diese Summe ergibt für jedes Bildelement Helligkeit, Farbton und Sättigung.

Abb. 38 zeigt die Momentanwerte von je 2 aufeinanderfolgenden Schaltzyklen, wobei die Farbe sich nicht ändern soll. Die Anteile für Rot, Grün und Blau sind verschieden, daher haben die Impulse verschiedene Amplituden, ebenso die aus den Impulsen erzeugten Sinusschwingungen. Durch die Addition



verlieren die 3 Grundfarben ihre Identität nicht. Durch einen Synchronschalter werden aus dem am Empfänger vom Bildgleichrichter gelieferten Signal die 3 Farbanteile wieder getrennt. Dies ist in Abb. 39 für einige Stellen eines Bildes dargestellt. Kurve A

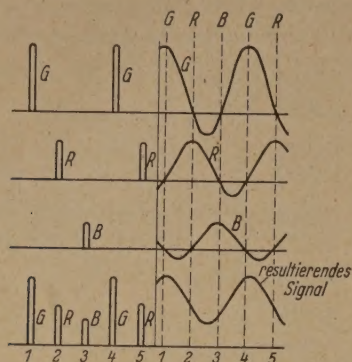


Abb. 38. RCA-System, Signale nach dem Farbschalter an der Aufnahmeseite.

der Abb. 39 zeigt zunächst die vom Abfrageschalter ermittelten Momentanwerte für eine dunkle, unbunte Bildstelle (die Amplituden von R, G und B seien sehr klein aber gleich groß), dann die Momentanwerte für eine helle, für eine grüne und für eine gelbe Stelle

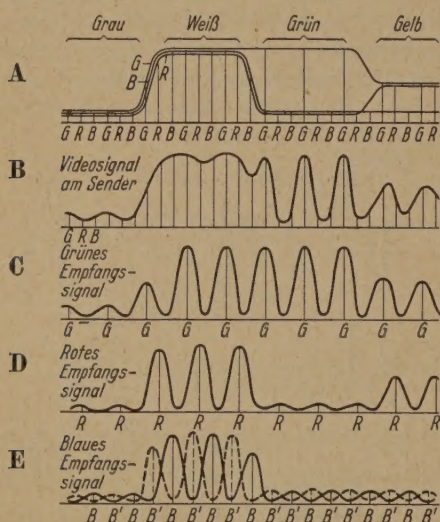


Abb. 39. Impulsfolgen für Flächen verschiedener Farbe und Helligkeit am Sender und am Empfänger.

eines Farbbildes. Kurve B zeigt das ausgestrahlte Bildsignal, C das vom Farbschalter am Empfänger ermittelte Signal für den Grünanteil, D für den Rotanteil und E schließlich für den Blauanteil. Diese Signale, die in ihrer Amplitude den am Sender festgestellten Farbanteilen entsprechen, werden nach weiterer Filterung den 3 Guns der Dreifarbröhre zugeführt.

Das vom Farbverteiler übertragene Frequenzgebiet enthält in der Hauptsache nur die Farbwerte über jeweils einige Bildelemente. Die Einzelheiten des Bildes (Frequenzen über 2 MHz) werden als Schwarz-Weiß-Modulation allen 3 Elektronenquellen der Farbröhre unter Umgehung des Verteilers direkt zugeführt (Addierstufen).

Die Trennung der 3 Farbanteile aus den am Sender vektoriell addierten Teilspannungen ist nur möglich, weil die Phasenverschiebung der 3 Grundschwin-

gungen von 3,6 MHz starr  $120^\circ$  beträgt. In dem Augenblick, in dem die Schwingung einer Farbe Maximum hat, ist die Amplitude der beiden anderen Sinusschwingungen gleich Null. Sobald der Verteiler am Empfänger synchron und in Phase verläuft mit dem Abfrageschalter des Senders, hat der empfangenseits vom Schalter abgegebene Serie von Impulsen im wesentlichen denselben Verlauf wie die Impulse der Sendeseite.

Die vom Empfangsverteiler an das „grüne“ G der Dreifarbröhre abgegebenen Impulse haben beispielsweise dieselbe relative Höhe wie die von der „grünen“ Aufnahmeröhre ermittelten Impulse, unabhängig von den Amplituden der roten und blauen Impulse.

Diese gegenseitige Unabhängigkeit der 3 Impulse gilt aber nur, solange die Flächen gleicher Farbe genügend groß, oder die Übergänge zwischen 2 Farben so diffus sind, daß die Videosignale aller 3 Kamerateile eine obere Frequenzgrenze von halber Schaltfrequenz haben ( $3,6/2 = 1,8$  MHz). Sobald die Farbauszeichnung höhere Frequenzanteile enthalten, sprechen die Farbsignale gegenseitig über, die Amplituden zweier Farbtöne sind nicht mehr Null in dem Augenblick, in dem die dritte Farbe durch ein Maximum geht. In dem addierten Farbanteilen des Empfangsbildes macht sich dieses Übersprechen als Verfälschung des Farbtönen und der Sättigung bemerkbar. Die Wirkung des Farbübersprechens ist ähnlich derjenigen der „mixed highs“. Beide zusammen ergeben eine erhebliche, aber angeblich erträgliche Verschlechterung der Farbsättigung. Quantitativ wird die Frage des Übersprechens und der Verzerrung der Farben in Arbeiten von MARCHAND, HOLLOWAY und LEIFER [57] und in einem Bericht aus den Laboratorien der RCA [58] behandelt.

Die ursprüngliche Bezeichnung für das oben beschriebene RCA-Verfahren — Farbwechselverfahren in Punktfolge — wurde neuerdings geändert. Die 3 Aufnahme- und 3 Wiedergabeorgane ständig in Funktion sind, ist das System richtiger in die Klasse der Simultan-Verfahren einzureihen. Es hängt nun von der Filterung der vom Empfangsverteiler erzeugten Impulse ab, ob sich die Steuerungen der drei Lichtquellen zeitlich überlappen.

Die elektrische Übertragung der für die Kennzeichnung einer Farbe notwendigen 3 Signale wird durch die Zahl und Funktion der verwendeten Sinusschwingungen beschrieben. Das RCA-Verfahren arbeitet demgemäß mit einem amplitudenmodulierten Hauptträger und einem phasen- und amplitudenmodulierten Hilfsträger. Der Hauptträger übernimmt im wesentlichen die Helligkeit des Bildes (Gr + „mixed highs“), der Hilfsträger von 3,6 MHz durch Phasenmodulation den Farbton, durch Amplitudenmodulation die Farbsättigung. Haupt- und Hilfsträger liegen im gleichen Frequenzgebiet. In der Praxis treten hierbei zuerst aufgetretenen Interferenzen zwischen Haupt- und Hilfsträger und deren Seitenbändern auf, die erheblich verringert, wenn die Frequenz des Hilfsträgers, die Schalterfrequenz, ein ungerades Vielfaches der halben Zeilenfrequenz ist.

Beim Abtasten eines Bildes entstehen, von einem niederfrequenten Anteil abgesehen, nur Harmonische der Zeilenfrequenz. Moduliert man mit dem durch das Abtasten eines Bildes entstandenen Signal ein



h frequenten Träger, so sind auch dessen Seitenbänder ganzzahlige Vielfache der Zeilenfrequenz. Die gesamte Energie eines Fernseh-Senders ist also in ein Linienspektrum aufgeteilt, wie dies Abb. 40 zeigt. Die ausgezogenen Linien sind in dem in der Abbildung gewählten Beispiel die 82. und 83. Harmonische der Zeilenfrequenz. Die neben jeder Harmonischen stehenden Seitenbänder liegen im Abstand der Trägerfrequenz und deren Harmonischen. Der größte Teil des für eine Fernseh-Übertragung verwendeten Frequenzspektrums ist demnach unbenutzt. GRAY [1929] vorgeschlagen, den ungenutzten Platz im Frequenzspektrum eines Fernseh-Senders durch Linien auszufüllen, die verschiedenen Farben eines Bildes zugeordnet sein sollen. Legt man also zwischen die 82. und die 83. Harmonische (und ebenso zwischen die übrigen Harmonischen) ein zweites Spektrum, das nur ungeradzahlige Oberwellen der halben Zeilenfrequenz enthält — in Abb. 40 die 165. Harmonische von  $f_z/2$  — so läßt sich durch dieses zweite Signal die Information übermitteln. Es ist das Verdienst von DOME [22, 23], auf diesen Weg erneut verwiesen zu haben.

d) Verfahren der Philco Corp., der Hazeltine Corp. und des National Television System Committee.

Unabhängig von der Entwicklungsarbeit der RCA bestand in den Laboratorien der Philco Corporation ein Punktstreuungsverfahren, über das BOOTHROYD [1951] berichtet hat.

In den Laboratorien der Hazeltine Corporation haben A. V. LOUGHLIN und CH. J. HIRSCH [59] vom Punktstreuungsverfahren der RCA ausgehend, erhebliche Verbesserungen der Farbbilder erhalten durch gleichzeitige Benutzung des BEDFORDSchen Prinzips der „mixed highs“ und der Bandaufteilung nach GRAY. Das in Abb. 36 und 37 gezeigte Blockschema eines Farbsenders und -empfängers enthält bereits den punktfrequenten Farbwechsel und die „mixed highs“. Das aus der Zusammenarbeit der RCA und der Hazeltine Corporation entstandene System führt die Bezeichnung „by-passed mixed highs“ oder „by-passed monochrome picture“.

Die Funktionen des Hilfsträgers haben sich im Laufe der beiden letzten Jahre wiederholt geändert. Sprungförmig von der RCA zur Übertragung der Anteile der 3 Grundfarben verwendet, wird nach den Vorschlägen von LOUGHLIN und BAILY (Hazeltine Corp.) und von BRADLEY und BINGLEY (Philco Corp.) der Hilfsträger neuerdings zur Steuerung des Farbes und der Farbsättigung verwendet. Die Helligkeit des Bildes moduliert die Amplitude des Hauptträgers. Der Hilfsträger ist auch hier amplituden- und phasenmoduliert. Aus den Signalen für Farbton und Farbsättigung werden 2 Wechselfrequenzen der Frequenz des Hilfsträgers mit einer Phasenverschiebung von  $90^\circ$  erzeugt, die diesen Hilfsträger modulieren. Durch Verwendung des Synchronschalters lassen sich am Empfänger die beiden um  $90^\circ$  verschobenen Komponenten trennen.

Die Farbsysteme der verschiedenen Gesellschaften werden seit November 1950 durch das „National Television System Committee“ koordiniert. Das von diesem Committee vorgeschlagene Farbverfahren ist in den Arbeiten von B. D. LOUGHLIN [60] und von HIRSCH, BAILEY und LOUGHLIN [61] behandelt wor-

den. Es führt die Bezeichnung „Constant Luminance System“. Eine Beschreibung dieses Systems und eines von der Philco Corporation entwickelten Verfahrens an dieser Stelle muß unterbleiben, da Umwandlungen der Farbsignale der 3 Aufnahme- und Übertragungsrohren vorgenommen werden, die nur nach eingehender Darstellung der Farbmetrik verständlich sind.

Zum Schluß sei noch auf 2 Veröffentlichungen verwiesen: auf den Bericht des „Senate Advisory Committee“

über den Stand des Farbfernsehens in USA vom September 1950 [62] und auf den Sonderheft der Proc. of the J. R. E. vom Oktober 1951 über Farbfernsehen einleitenden Aufsatz von G. FINK [63], der einen ausgezeichneten Überblick gibt über die entwickelten Systeme, die Ideen, von denen diese Entwicklung geleitet wurde, und über Vor- und Nachteile der verschiedenen Systeme. Welches dieser Systeme in einem künftigen Farbfernsehen zur Anwendung gelangen wird, ist heute noch völlig unbestimmt.

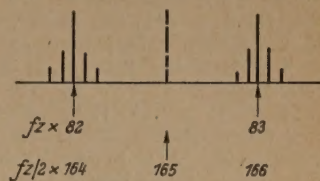


Abb. 40. Frequenzspektrum beim Abtasten eines Bildes mit der Zeilenfrequenz  $f_z$ .

- Literatur.** [1] EPSTEIN, D. W. u. L. PENSACK: RCA-Rev. 7, 5 (1946). — [2] DOME, R. B.: Television Principles. Mc Graw-Hill B. C., New York 1951. — [3] FINK, D. G.: Television Engineering. Mc Graw-Hill B. C., New York, Sec. Ed. 1952. — [4] KERKHOF, F. u. W. WERNER: Fernsehen. Philips A. G., Eindhoven 1951. — [5] MOSS, H.: Advances in Electronics 2, 2 (1950). — [6] GARLICK, G. F. J.: Cathodoluminescence, Advances in Electronics 2, 152 (1950). — [7] RICHTER, M.: Grundriß der Farbenlehre. Th. Steinkopf, Dresden (1940). — [8] BOUMA, P. J.: Farbe und Farbwahrnehmung. Phil. Techn. Bibl., Eindhoven (1946). — [9] SCHRÖDINGER, E.: Die Gesichtsempfindungen, Müller-Pouillet, Lehrb. d. Phys. Bd. 2, Teil 1 (1926). — [10] SCHROBER, H.: Phys. Z. 38, 514 (1937). — [11] GROOT, W. DE u. A. A. KRUTHOF: Phil. Techn. Rundsch. 12, 140 (1950). — [12] CHERRY, W. H.: RCA-Rev. 8, 427 (1947). — [13] WINDRINGHAM, W. T.: Proc. J. R. E. 39, 1135 (1951). — [14] LUCKIESH, M.: Elec. World 58, 1252 (1911). — [15] BALDWIN JR., M. W.: Proc. J. R. E. 39, 1173 (1951). — [16] WALLS, G. L.: J. opt. Soc. Amer. 33, 487 (1943). — [17] JESTY, L. C. u. N. R. PHELPS: J. Brit. J. R. E. 12, 247 (1952). — [18] Office of Scientific Research and Development, Report 4541, Influence of Color-Contrast on Visual Acuity (1944). — [19] KELL, R. D., G. C. SZIKLAI, R. C. BALLARD, A. C. SCHROEDER, K. R. WENDT u. G. L. FREDENHALL: Proc. J. R. E. 35, 861 (1947). — [20] BEDFORD, A. V.: Proc. J. R. E. 38, 1003 (1950). — [21] MERTZ, P. u. F. GRAY: Bell Syst. Techn. Journ. 13, 464 (1934). — [22] DOME, R. B.: Electronics 23, Sept. 70 (1950). — [23] DOME, R. B.: Proc. J. R. E. 39, 1323 (1951). — [24] JVES, H. E. u. A. L. JOHNSRUD: Journ. Opt. Soc. Amer. 20, 11 (1930). — [25] KAROLUS, A.: Bull. des Schweiz. El. Ver. 40, 566 (1948). — [26] DIMMIK, G. L.: Journ. Soc. Mot. Pict. Eng. 38, 36 (1942). — [27] KAROLUS, A.: Z. angew. Phys. 4, 71 (1952). — [28] ERDE, B.: Journ. Soc. Mot. Pict. Eng. 51, 351 (1948). — [29] BRIL, A. u. F. A. KRÖGER: Phil. Techn. Rundsch. 12, 120 (1950). — [30] BRONWELL, A. B.: Tele-Tech 7, 40 und 60 (1948). — [31] HEROLD, E. W.: Proc. J. R. E. 39, 1177 (1951). — [32] FORGUE, S. V.: Proc. J. R. E. 39, 1212 (1951). — [33] WEIMER, P. K. u. N. RYNN: Proc. J. R. E. 39, 1201 (1951). — [34] BOND, D. S., F. H. NICOLL u. D. G. MOORE: Proc. J. R. E. 39, 1218 (1951). — [35] LAW, H. B.: Proc. J. R. E. 39, 1186 (1951). — [36] LAW, R. R.: Proc. J. R. E. 39, 1194 (1951). — [37] FREEDMAN, N. S. u. K. M. LAUGHLIN: Proc. J. R. E. 39, 1230 (1951). — [38] Ohne Verf.: Electronics 24, Dez. 89 (1951). — [39] Ohne Verf.: Electr. Eng. 15, 137 (1943) und 17, 140 (1944). — [40] DU MONT, A. B., Labs.: Electronics 20, März 113 (1947). — [41] FLECHSIG, W.: D. R. P. 736 575 (1938) und franz. Pat. 866 065. — [42] BARNES, B. E. u. R. D. FAULKNER: Proc. J. R. E. 39,



1241 (1951). — [43] FRIEND, A. W.: Proc. J. R. E. **39**, 1249 (1951). — [44] ORMER, D. D. VAN u. D. C. BALLARD: Proc. J. R. E. **39**, 1245 (1951). — [45] MOODY, H. C. u. D. D. VAN ORMER: Proc. J. R. E. **39**, 1236 (1951). — [46] GOLDMARK, P. C., J. N. DYER, E. R. PIORE u. J. M. HOLLYWOOD: Proc. J. R. E. **30**, 162 (1942). — [47] GOLDMARK, P. C., E. R. PIORE, T. H. CHAMBERS u. J. J. REEVES: Proc. J. R. E. **31**, 465 (1943). — [48] GOLDMARK, P. C.: Journ. Brit. J. R. E. **10**, 208 (1950). — [49] GOLDMARK, P. C.: J. W. CHRISTENSEN u. J. J. REEVES: Proc. J. R. E. **39**, 1288 (1951). — [50] GOLDMARK, P. C. u. J. M. HOLLYWOOD: Proc. J. R. E. **39**, 1314 (1951). — [51] RCA Laboratories Division, Princeton N. J.: RCA-Rev. **7**, 459 (1946). — [52] KELL, R. D., G. L. FREDENHALL, A. C. SCHROEDER u. R. C. WEBB: RCA-Rev. **7**, 141 (1946). — [53] RCA-Laboratories Division, Princeton N. J.: RCA-Rev. **10**, 504 (1949). — [54] RCA Laboratories

Division, Princeton N. J.: RCA-Rev. **11**, 431 und 255 (1950). — [55] GEORGE, F. S.: Proc. J. R. E. **39**, 124 (1951). [56] DOME, R. B.: Electronics **25**, Febr. 96 (1952). [57] MARCHAND, N., H. R. HOLLOWAY u. M. LEIFER: Proc. J. R. E. **39**, 1280 (1951). — [58] BOOTHROYD, W.: Electronics **22**, Dez. 88 (1949) und **23**, 96 Jan. (1950). [59] LOUGHREN, A. V. u. CH. J. HIRSCH: Electronics **24**, Febr. (1951). — [60] LOUGHLIN, B. D.: Proc. J. R. E. **39**, 1264 (1951). — [61] HIRSCH, J., W. F. BAILEY u. B. LOUGHLIN: Electronics **25**, 88 Febr. (1952). — [62] Report of the Senate Advisory Committee: Proc. J. R. E. **38**, 1264 (1950). — [63] FINK, D. G.: Proc. J. R. E. **39**, 1124 (1951).

Prof. Dr. A. KAROLUS,  
Zollikon-Zürich, Höhest. 52.

## Buchbesprechungen.

**Madelung, E.: Die mathematischen Hilfsmittel des Physikers.** 4. Auflage. Berlin-Göttingen-Heidelberg: Springer 1950, Sammlung: Die Grundlehren der mathematischen Wissenschaften in Einzeldarstellung, Bd. IV. XX, 531 S. u. 29 Abb. DM 47.—

Der erste Teil: *Mathematik* enthält die Abschnitte: Zahlen, Funktionen und Operatoren; Differential- und Integralrechnung; Reihen und Reihenentwicklungen; Funktionen; Algebra, Transformationen, Vektoranalysis; spezielle Koordinatensysteme; Gruppentheorie; Differentialgleichungen; Integralgleichungen; Variationsrechnung; Statistik (Wahrscheinlichkeitsrechnung). Der zweite Teil: *Physik* hat die Abschnitte Mechanik, Elektrodynamik (einschl. Optik), Relativitätstheorie, Quantentheorie, Thermodynamik, statistische Methoden. Im Anhang in 21 Nummern Beispiele zu den 2 Teilen und nützliche Tabellen. —

Viel Freude macht es, die kurzen Bemerkungen zu lesen, die Madelung voranstellt: Die Einleitung über die Aufgabe und die Methoden der mathematischen Physik, über das Begriffssystem der Mathematik, über das Begriffssystem der theoretischen Physik. Neu gegenüber früheren Auflagen ist der Abschnitt Zahlen, Funktionen und Operatoren im ersten Teil. Er enthält u. a. eine Zusammenstellung über die  $\delta$ -Funktion und über Spinoperatoren und Spinoren. Neugefaßt sind die Abschnitte Relativitätstheorie, Quantentheorie, Thermodynamik im zweiten Teil. In dem Abschnitt Relativitätstheorie wird in der Nummer „allgemeine Feldtheorie“ eine kurze Zusammenstellung über den Zusammenhang zwischen LAGRANGE-Funktion, Feldgleichungen, Impuls-Energie-Erhaltungssatz, HAMILTON-Funktion gegeben. Im Abschnitt Quantentheorie wird vor allem das Begriffssystem und der Formelschatz der Wellenmechanik behandelt, dann die DIRACsche Theorie des Elektrons und die Strahlungstheorie mit besonderer Betonung der Quantentheorie der Strahlung.

Immer wieder fällt die eigenwillige, zum Nachdenken anregende, Formulierung allgemeiner Aussagen auf. Nach meiner Ansicht erreicht das Buch wirklich, was es vorhat: Für den Theoretiker das zu geben, was der KOHLRAUSCH für den Experimentalphysiker ist. Ich freue mich, das Buch zu besitzen.

BECHERT.

**Schaefer, Cl.: Einführung in die theoretische Physik.** 1. Bd., Mechanik materieller Punkte, Mechanik starrer Körper und Mechanik der Kontinua (Elastizität und Hydro-mechanik). 5. Aufl. XII, 990 S. und 272 Abb. DM 54.— 3. Bd., 2. Teil, Quantentheorie, 2. Aufl. VII, 510 S. und 88 Abb. DM 40.— Berlin: Walter de Gruyter & Co. 1950 und 1951. Preis geb. DM 54.—

Die 5. Aufl. des ersten Bandes stellt einen anastatischen Neudruck der seit Jahren vergriffenen 4. mit der 3. fast übereinstimmenden Auflage dar, bei dem alle bekannt gewordenen Druckfehler und Versehen verbessert wurden.

Es sei betont, daß in diesem Band auch die Akustik m verarbeitet ist. Überhaupt sind mit besonderer Vorliebe Schwingungsprobleme behandelt, denen ein großer Teil wissenschaftlichen Tätigkeit des Verf. angehört. Die einschlägigen Abschnitte, bei denen Integralgleichungen benutzt sind, können dabei, wie Verf. betont, beim erst Studium des Buches überschlagen werden. Andererseits werden gerade diese Abschnitte wegen ihrer Eigenart manche Leser besonders interessieren. Darüber, ob es heute noch zweckmäßig ist, die Vektoranalysis erst an den Stellen, wo sie gebraucht wird, zu entwickeln, wie Verf. es tut, muß man wohl zweifelhaft sein, da die Vektoranalysis doch schon zum überall benutzten Handwerkszeug des theoretischen Physikers gehört. Umgekehrt ist auf das Tabellenwerk von JAHNKE und EMDE häufig Bezug genommen. Der EINSTEINsche Relativitätstheorie wurde in der 3. Auflage aus dem Jahre 1928, mit der ja die 5. Auflage im wesentlichen noch übereinstimmt, nur durch wenige kurze Zusätze Rechnung getragen. Es ist eben schwer, ein Buch über vier Jahrzehnte hindurch ganz der rapiden Entwicklung anzupassen, umso mehr, wenn in diese Jahrzehnte zwei Weltkriege fallen! — Das Studium des Buches wird durch die klare und ausführliche Darstellung sehr erleichtert.

Im Gegensatz zum 1. Band ist der vorliegende 2. Teil des 3. Bandes über die Quantentheorie nicht nur ein Ausdruck der vorhergehenden Auflage, sondern eine der neueren Entwicklung voll Rechnung tragende Umarbeitung, bei der Verf., wie er angibt, auch von M. PLANCK beraten wurde. Auch bei diesem Band werden viele Leser die klare und ausführliche Darstellung dankbar begrüßen. Es ist zunächst auf das BOHRsche Atommodell eingegangen, sodann werden die wasserstoffähnlichen Spektren und allgemeiner optischen Spektren behandelt, weiter Periodisches System und Röntgenstrahlung, die Grundlagen der Wellenmechanik, ihre Anwendungen und ihre statistische Deutung. Hier werden auch die Grundzüge der HEISENBERGschen Matrixmechanik, sowie die BOSE-EINSTEINsche und die FERMI-DIRACsche Statistik dargelegt. Ein besonderes Kapitel der Strahlung, einschließlich Dispersion und RAMAN-Effekt, ist gewidmet. Das letzte Kapitel bringt die relativistische Verallgemeinerung der Wellenmechanik und eine Einführung in die DIRACsche Theorie. — Interessant ist das Schlußwort des Verf. Ihm erscheint der Verzicht auf die Determiniertheit des Einzelprozesses eine wesentliche Schwierigkeit der Wellenmechanik. Er ist wie einige andere hervorragende Theoretiker der Meinung, daß dieser Verzicht kein erzwungen gültiger sein darf. Vielmehr schließt er sich dem Einwand von LAUES an, daß bei den Beweisen für die Notwendigkeit der Indeterminiertheit mit Begriffen operiert wird (z. B. Impuls, Geschwindigkeit), die auf die NEWTONsche Punktmechanik zugeschnitten sind. Verf. meint, daß die gegenwärtige Physik alle Kennzeichen eines Durchgangsstadiums an sich trägt.

W. MEISSNER.